

# APPLICATION UNDER UNITED STATES PATENT LAWS

Atty. Dkt. No. 061069-0308250

Invention: OPTICAL APPARATUS

Inventor (s): Kimihiko NISHIOKA  
Kentaro SEKIYAMA

**Address communications to the  
correspondence address  
associated with our Customer No**

**00909**

Pillsbury Winthrop LLP

This is a:

- ☐ Provisional Application
- ☒ Regular Utility Application
- ☐ Continuing Application
  - ☐ The contents of the parent are incorporated by reference
- ☐ PCT National Phase Application
- ☐ Design Application
- ☐ Reissue Application
- ☐ Plant Application
- ☐ Substitute Specification
  - Sub. Spec Filed \_\_\_\_\_
  - in App. No. \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_
- ☐ Marked up Specification re
  - Sub. Spec. filed \_\_\_\_\_
  - In App. No \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_

## SPECIFICATION

光学装置  
Optical Apparatus

BACKGROUND OF THE INVENTION

1. Field of the Invention

本発明は、利用者が用いる画像を得るための光学装置に関するものである。

2. Description of the Related Art

従来、この種の光学装置では、物体の画像の特定の部分だけを詳しく見たい、あるいは、拡大したい、という利用者からのニーズがあった。これに対して、例えば、デジタルカメラやテレビカメラ等の撮像装置では、光学式ズームや電子ズーム（デジタルズームともいう）が上記ニーズに応える技術として用いられてきた。電子ズームの技術は、例えば、特開 2 0 0 2 - 3 2 0 1 3 5 号に記載されている。

また、望遠鏡等では、接眼レンズを交換することで変倍を行い、上記ニーズに応えてきた。また、顕微鏡等では、対物レンズを交換することで、上記ニーズに応えてきた。

例えば、電子ズームを用いた光学装置、例えばデジタルカメラでは、デジタルカメラ内部の撮像素子の撮像面の中心部分に撮像光学系を介して撮像し保存した画像を、画像処理装置等により拡大、画素補間等の処理をして表示装置等に表示あるいは出力するようになっている。

また、望遠鏡や顕微鏡等では、接眼レンズ又は対物レンズの変更に伴い、全光学系の組合せ収差が変化する。

SUMMARY OF THE INVENTION

本発明による光学装置は、光学特性可変光学素子を備えた光学系を有していて、利用する像に対応する物体範囲の変更と共に前記光学特性可変光学素子の光線偏向作用を変化させて、前記光学系の収差を最適化するようにしたことを特徴としている。

また、本発明による光学装置は、光学特性可変光学素子と、光学特性可変光学素子を駆動する駆動回路と、電子ズーム機能を備えたことを特徴としている。

また、本発明による光学装置は、好ましくは、少なくとも2つの光学素子群を有し、電子ズーム時に前記光学素子群の少なくとも1つが変更されることを特徴としている。

また、本発明による光学装置は、光学特性可変光学素子を備えた光学系を有する変倍可能な光学装置において、変倍に伴って光学特性可変光学素子の光線偏向作用を変化させることにより、変倍に伴って変化する光学系の収差を最適化するようにしたことを特徴としている。

また、本発明による光学装置は、複数の光学ユニットを組合せて用い、いずれかのユニットが光学特性可変光学素子を備え、組合せの変更と共に光学特性可変光学素子の光線偏向作用を変化させることにより、変更に伴って変化する光学系の収差を最適化するようにしたことを特徴としている。

また、本発明による光学装置は、複数の光学ユニットを含み、いずれかの光学ユニットが光学特性可変光学素子を備え、変倍と共に光学特性可変光学素子の光線偏向作用を変化させることによって、変倍に伴って変化する光学系の収差を最適化するようにしたことを特徴としている。

本発明によれば、前記光学装置は、観察装置、望遠鏡、顕微鏡及び内視鏡の何れかである。

また、本発明によれば、前記光学特性可変光学素子は、可変焦点レンズ又は可変ミラーである。

また、本発明による光学装置は、電子ズーム機能を備えていて、電子ズーム時に、光学系のある部分を変更することによって、電子ズーム時に利用される像領域の像の鮮鋭度を向上させるようにしたことを特徴としている。

また、本発明による光学装置は、光学特性可変光学素子と、光学特性可変光学素子を駆動する駆動回路と、電子ズーム機能を備えていて、電子ズームを行う時に、光学特性可変光学素子を含む光学系の電子ズームで拡大する領域の像の鮮鋭度が最良になるように、光学特性可変光学素子を駆動することを特徴としている。

また、本発明による光学装置は、光学特性可変光学素子と、光学特性可変光学

素子を駆動する駆動回路と、電子ズーム機能を備えていて、電子ズームを行う時に、光学特性可変光学素子を含む光学系の電子ズームで拡大する領域の像の鮮鋭度が物体距離の変化、温度、湿度、製造誤差、経時変化、振れ、光学的変倍のいずれか1つ以上で生ずる結像状態の変化も考慮して最良になるように、光学特性可変光学素子を駆動することを特徴としている。

また、本発明による光学装置は、光学特性可変光学素子と、光学特性可変光学素子を駆動する駆動回路と、電子ズーム機能を備えていて、電子ズームを行う時に、光学特性可変光学素子を含む光学系の電子ズームで拡大する領域の像の鮮鋭度が光学装置の製造誤差も含めて最良になるように、光学特性可変光学素子を駆動するようにしたことを特徴としている。

また、本発明による光学装置は、光学特性可変光学素子と、光学特性可変光学素子を駆動する駆動回路と、駆動情報と、撮像素子と、電子ズーム機能を備えていて、電子ズームを用いて撮像を行う時に、光学特性可変光学素子を含む光学系の電子ズームで拡大する領域の像の収差が低減するように、光学特性可変光学素子を駆動するようにしたことを特徴としている。

また、本発明によれば、前記光学特性可変光学素子を含む光学系は、単焦点光学系またはズーム光学系であることを特徴としている。

また、本発明による光学装置は、好ましくは、オートフォーカス機能を備えている。

また、本発明による光学装置は、前記光学特性可変光学素子に加わる駆動情報を変えつつ撮像を行い、撮像した画像のピントあるいはコントラストがほぼ最良になる駆動情報を求め、その駆動情報で可変ミラーを駆動し、撮像を行うようにしたことを特徴としている。

また、本発明による光学装置は、好ましくは、像の振れ補正機能を備えている。

また、本発明による光学装置は、光学特性可変光学素子と、光学特性可変光学素子を駆動する駆動回路と、少なくとも1つの光学素子群と、電子ズーム機能を備え、前記光学特性可変光学素子と、前記光学素子群とを電子ズーム時に連携して駆動させることにより、電子ズーム時に利用される画像領域の鮮鋭度を向上させるようにしたことを特徴としている。

また、本発明による光学装置は、電子ズームを行うのと同時に絞りを開くようにしたことを特徴としている。

また、本発明による光学装置は、電子ズームの倍率が、ある状態で下記の式を満足することを特徴としている。

$$1.05 < \beta_E < 30 \times \sqrt{(M/10^6)}$$

ただし、 $\beta_E$ は電子ズーム倍率、Mは撮像素子の画素数である。

また、本発明による光学装置は、電子ズームの倍率が、ある状態で下記の式を満足することを特徴としている。

$$M \geq 20 \text{ 万}$$

ただし、 $\beta_E$ は電子ズーム倍率、Mは撮像素子の画素数である。

また、本発明による光学装置は、電話機能を備えたことを特徴としている。

また、本発明による光学装置は、好ましくは、携帯電話である。

また、本発明による光学装置は、画像表示機能を備えたことを特徴としている。

また、本発明による光学装置は、電子ズーム時に前記光学素子群の少なくとも1つを移動させることにより、像の利用する部分の鮮鋭度を向上させるようにしたことを特徴としている。

本発明による電子撮像装置は、撮像素子を備えていて、電子ズーム時に絞りを開くようにしたことを特徴としている。

また、本発明によれば、小型で、変倍ができ、変倍比を大きくしても画像の鮮鋭度が高い光学装置を提供することができる。

These and other features and advantages of the present invention will become apparent from the following detailed description of the preferred embodiments when taken in conjunction with the accompanying drawings.

#### BRIEF DESCRIPTION OF THE DRAWINGS

図1は本発明による光学装置の第1実施例の概略構成図である。

図2は光学装置における撮像素子の撮像面と撮像される画像との関係を示す説明図である。

図3A及び3BはLUTにおけるデータの構成例を夫々示す説明図である。

図4は光学装置における撮像素子の撮像面と撮像される画像との関係を示す説

明図である。

図 5 は本発明による光学装置の第 2 実施例の概略構成図である。

図 6 は本発明による光学装置の第 3 実施例の概略構成図である。

図 7 は本発明による光学装置の第 4 実施例の概略構成図である。

図 8 は本発明による光学装置の第 5 実施例の概略構成図である。

図 9 は本発明の光学装置に適用可能な光学系の第 1 実施例の Y - Z 断面図である。

図 10 は図 9 の光学系の物点距離無限遠における横収差図である。

図 11 は第 1 実施例の物点距離 150 mm における横収差図である。

図 12 は第 1 実施例の光学系により 2 倍の電子ズームを行った場合の物体 - Y 方向  $9.67^\circ$  (物体の方向が X :  $0.000^\circ$  で Y :  $-9.67^\circ$  のことをいう) の波動光学的 MTF (140 本/mm) を示すグラフであり、撮像素子の撮像面のサイズを  $2\text{ mm} \times 1.5\text{ mm}$  と考えて、物体距離無限遠において像の鮮鋭度がこの領域内で向上するように薄膜の形状を最適化したときの MTF を示している。

図 13 は第 1 実施例の光学系により 2 倍の電子ズームを行った場合の物体 - Y 方向  $9.67^\circ$  (物体の方向が X :  $0.000^\circ$  で Y :  $-9.67^\circ$  のことをいう) の波動光学的 MTF (140 本/mm) を示すグラフであり、撮像素子の撮像面のサイズを  $2\text{ mm} \times 1.5\text{ mm}$  と考えて、物体距離 15 cm において像の鮮鋭度がこの領域内で向上するように薄膜 409 a の形状を最適化したときの MTF を示している。

図 14 は第 1 実施例の光学系において薄膜の形状を最適化しないときの MTF を示すグラフであり、撮像面サイズが  $4\text{ mm} \times 3\text{ mm}$  である場合の物体距離無限遠における薄膜 409 a の形状を最適化しないときの MTF を示している。

図 15 は第 1 実施例の光学系において薄膜の形状を最適化しないときの MTF を示すグラフであり、撮像面サイズが  $4\text{ mm} \times 3\text{ mm}$  である場合の物体距離 15 cm における薄膜の形状を最適化しないときの MTF を示している。

図 16 は本発明の光学装置に適用可能な光学系の第 2 実施例の概略構成を

示す Y-Z 断面図であり、広角端の状態を示している。

図 17 は本発明の光学装置に適用可能な光学系の第 2 実施例の概略構成を示す Y-Z 断面図であり、標準の状態を示している。

図 18 は本発明の光学装置に適用可能な光学系の第 2 実施例の概略構成を示す Y-Z 断面図であり、望遠端の状態を示している。

図 19 は図 16 ~ 図 18 に示した第 2 実施例の光学系において、2 倍電子ズームを行ったときの MTF を示すグラフである。

図 20 は図 16 ~ 図 18 に示した第 2 実施例の光学系において、可変ミラーの形状を電子ズームを行うときに利用する画像の部分だけに対して最適化したときの MTF を示すグラフである。

図 21 は本発明の光学装置に用いる光学系に適用可能な光学特性可変光学素子としての形状可変ミラーの一構成例を示す概略図である。

図 22 は可変ミラーの他の構成例を示す概略図である。

図 23 は図 21 及び図 22 の可変ミラーに用いる電極の一形態を示す説明図である。

図 24 は図 21 及び図 22 の可変ミラーに用いる電極の他の形態を示す説明図である。

図 25 は可変ミラーのさらに他の構成例を示す概略図である。

図 26 は可変ミラーのさらに他の構成例を示す概略図である。

図 27 は可変ミラーのさらに他の構成例を示す概略図である。

図 28 は図 27 の構成例における薄膜コイルの巻密度の状態を示す説明図である。

図 29 は可変ミラーのさらに他の構成例を示す概略図である。

図 30 は図 29 の構成例におけるコイルの一配置例を示す説明図である。

図 31 は図 29 の構成例におけるコイルの他の配置例を示す説明図である。

図 32 は図 27 に示した構成例において、コイルの配置を図 31 に示した構成例のようにした場合に好適な永久磁石の配置を示す説明図である。

図 33 は本発明の光学装置の光学系に適用可能な可変ミラーの概略構成図である。

図 3 4 は可変ミラーのさらに他の構成例に係る、マイクロポンプで流体を出し入れし、レンズ面を変形させる可変形状鏡の概略構成図である。

図 3 5 はマイクロポンプの一構成例を示す概略構成図である。

図 3 6 は本発明の光学装置の光学系に適用可能な可変焦点レンズの原理的構成を示す図である。

図 3 7 は一軸性のネマティック液晶分子の屈折率楕円体を示す図である。

図 3 8 は図 3 6 に示す高分子分散液晶層に電界を印加した状態を示す図である。

図 3 9 は図 3 6 に示す高分子分散液晶層への印加電圧を可変にした場合の一構成例を示す図である。

図 4 0 は本発明の光学装置に可変焦点レンズを用いたデジタルカメラ用の撮像光学系の一構成例を示す図である。

図 4 1 は本発明の光学装置の光学系に適用可能な可変焦点回折光学素子の一構成例を示す図である。

図 4 2 はツイストネマティック液晶を用いた可変焦点レンズを有する可変焦点眼鏡の構成例を示す図である。

図 4 3 は図 4 2 に示すツイストネマティック液晶層への印加電圧を高くしたときの液晶分子の配向状態を示す図である。

図 4 4 A 及び 4 4 B は本発明の光学装置の光学系に適用可能な可変偏角プリズムの二つの構成例を示す図である。

図 4 5 は図 4 4 に示す可変偏角プリズムの使用態様を説明するための図である。

図 4 6 は本発明の光学装置の光学系に適用可能な可変焦点レンズとして機能できる可変焦点ミラーの一構成例を示す図である。

図 4 7 は本発明の光学装置の光学系に他の構成例の可変焦点レンズを用いた撮像光学系の概略構成図である。

図 4 8 は図 4 7 の構成例における可変焦点レンズの変形例を示す説明図である。

図 4 9 は図 4 8 の可変焦点レンズが変形した状態を示す説明図である。

図 5 0 は本発明の光学装置の光学系に適用可能な可変焦点レンズのさらに他の



構成例に係る、マイクロポンプで流体を出し入れし、レンズ面を変形させる可変焦点レンズの概略図である。

図 5 1 は本発明の光学装置の光学系に適用可能な光学特性可変光学素子の他の構成例であって圧電材料を用いた可変焦点レンズの概略図である。

図 5 2 は図 5 1 の変形例に係る可変焦点レンズの状態説明図である。

図 5 3 は本発明の光学装置の光学系に適用可能な光学特性可変光学素子のさらに他の構成例であって圧電材料からなる 2 枚の薄板を用いた可変焦点レンズの概略図である。

図 5 4 は本発明の光学装置の光学系に適用可能な可変焦点レンズのさらに他の構成例を示す概略図である。

図 5 5 は図 5 4 の構成例に係る可変焦点レンズの状態説明図である。

図 5 6 は本発明の光学装置の光学系に適用可能な光学特性可変光学素子のさらに他の構成例であってフォトンカル効果を用いた可変焦点レンズの概略図である。

図 5 7 A 及び 5 7 B は図 5 6 の構成例に係る可変焦点レンズに用いるトランス型及びシス型アゾベンゼンの構造を夫々示す説明図である。

図 5 8 は本発明の光学装置の光学系に適用可能な可変ミラーのさらに他の構成例を示す概略図である。

図 5 9 A 及び 5 9 B はそれぞれ本発明の実施の形態にかかる光学装置の光学系に適用可能な電磁駆動型の可変ミラーの側面図及び反射膜の反対側から見た図である。

図 6 0 はニュートン式反射望遠鏡の従来例を示す概略構成図である。

図 6 1 は本発明にかかる光学装置である、形状可変ミラーを用いた反射望遠鏡の概略構成図である。

図 6 2 は本発明にかかる光学装置である、可変焦点レンズを用いた顕微鏡の概略構成図である。

## DETAILED DESCRIPTION OF THE PREFERRED EMBODIMENTS

図 1 は本発明の光学装置の第 1 実施例の概略構成図である。この実施例において、光学装置 3 0 2 は、光学特性可変光学素子としての可変ミラー 4 0 9 を備えた撮像光学系 3 0 1 と、撮像光学系 3 0 1 によって撮像素子等の記録素子に記録

した画像を画像処理によって拡大する電子ズーム機能を備えている。

電子ズームは、デジタルズームとも呼ばれ、例えば、特開 2 0 0 2 - 3 2 0 1 3 5 号に記載されているように、複数の画素をアドレスに割り当てられるようにメモリに格納された画像データに対して所定方向のズーム処理を施すものである。

撮像光学系 3 0 1 は、物体側より順に配置された、凹レンズ 3 0 9 と、可変ミラー 4 0 9 と、明るさ絞り 5 2 1 と、凸レンズ 9 0 1 a と、2 群 3 枚の凸レンズ群 9 0 2 a と、ローパスフィルター及び／又は赤外カットフィルター等の結像性能に影響を与えないフィルター 3 0 1 a とで構成されている。

また、撮像光学系 3 0 1 は、単焦点の光学系であり、可変ミラー 4 0 9 の反射面を形成する薄膜 4 0 9 a の形状の変形によって撮影距離が変化した場合のピント合わせを行うことができるように構成されている。

可変ミラー 4 0 9 は、輪帯状の支持台 4 2 3 の上面に支持された変形自在な 3 層構造からなり表面層が反射面となる薄膜 4 0 9 a と、薄膜 4 0 9 a を支持する中間の基板 4 0 9 j と、下層の薄い電極 4 0 9 k と、支持台 4 2 3 の下方側に電極 4 0 9 k に対し所定の間隔を設けて配置した複数の電極 4 0 9 b とを有している。電極 4 0 9 k と複数の電極 4 0 9 b は、電極 4 0 9 k と複数の電極 4 0 9 b との間に選択的に所定の電圧を印加して薄膜 4 0 9 a の形状を変形させるように電圧制御可能な可変抵抗器を備えた駆動回路 3 0 4 に接続されている。

駆動回路 3 0 4 は、電子ズームの際に、変形する薄膜 4 0 9 の形状、すなわち薄膜 4 0 9 において変形させる位置及び変形量を演算し、その演算結果に基づいて制御信号を出力する演算装置 4 1 4 に接続されている。演算装置 4 1 4 には、光学装置の使用環境データを取り込む温度センサー 4 1 5、湿度センサー 4 1 6、及び距離センサー 4 1 7 が接続されている。

上記電子ズームは、撮像光学系 3 0 1 によって撮像素子 4 0 8 の撮像面に結像された被写体のリアルタイム動画像を表示装置 3 0 6 に表示するように、撮像素子 4 0 8 の撮像面を形成する各々の画素（受光素子）からタイミングをとって画素信号を送り込んで信号処理する信号処理回路 3 0 8 と、信号処理回路 3 0 8 によって信号処理されたデータを表示装置 3 0 6 に拡大画像として表示するように処理する画像処理装置 3 0 3 と、信号処理回路 3 0 8 に対してタイミングをとっ

て画素信号を取り込むような制御信号を出力したり、画像処理装置 303 で画像処理した際の拡大画像のピント状態の結果を受けて撮像光学系 301 のピント合わせ及び撮像面において像の中心付近の鮮鋭度が高くなるように、可変ミラー 409 の反射面の形状を変形させる制御信号を演算する演算装置（マイクロプロセッサ） 414 とを介して行われるようになっている。

演算装置 414 には、上記電子ズーム時に演算をする演算手段と、この演算手段からの信号及び各センサー 415, 416, 417 からの信号に基づいて可変ミラー 409 の形状を制御するための演算をする演算手段が備えられている。

従って、可変ミラー 409 は、画像処理装置 303 に接続された演算装置 414 と駆動回路 304 によって制御されるように構成されている。そして、可変ミラー 409 は、撮像素子 408 に記録する画像に対し信号処理装置 308 及び画像処理装置 303 を介して電子ズームを行い表示装置 306 に表示するとき、撮像素子 408 に結像される物体像（被写体像）の中心付近の鮮鋭度を高くするため、可変ミラー 409 の反射面を形成する薄膜 409a が変形するように、ピント合わせの場合を含めて、駆動回路 304 を介して駆動される。

画像処理装置 303 で処理された画像は、表示装置 306 に表示することができるに加えて、プリンター 307 により印刷することも、記憶装置 305 に記録、保存することもできる。本実施例において、センサー 415, 416, 417 や、プリンター 307 等は、設けなくても良い。

図 2 は光学装置における撮像素子の撮像面と撮像される画像との関係を示す説明図である。従来の撮像装置では、通常電子ズームを行なうと、撮像素子 408 の撮像面 311 の中心部分 312 の像だけが画像として図 1 に示すような表示装置 306 に表示され、或いはプリンタ 307 を介して印刷され、あるいは記憶装置 305 に保存される。この画像を画像処理装置 303 によって拡大、画素補間等の処理をして、上記表示装置等に出力される。しかし、このままでは、物体 314 の像を撮像素子 408 に結像するための撮像光学系 301 で生じた収差も拡大された像となるため、ぼやけた像になるという欠点があった。

そこで、図 1 に示す第 1 実施例では、電子ズームを行なう場合、撮像素子 408 の撮像面 311 への撮像時に反射面を形成する薄膜 409a の形状を撮像面 3

1 1 の中心部分 3 1 2 の像の収差が少なくなるように制御する制御手段を備えている。この場合、中心部分 3 1 2 の外側領域の像の収差は悪くてもよい。殆どの場合、この外側領域の画像が表示、保存されることはないからである。ただし、もちろん中心部分 3 1 2 の外側領域の像の収差が良くなるように制御してもよい。

具体的な制御手段としては、例えば図 3 A 及び図 3 B に示すようなルックアップテーブル（以下、L U T と称する）を用いた手段がある。図 3 A 及び図 3 B は L U T におけるデータの一構成例をそれぞれ示している。

本例の L U T は、縦軸に図 1 に示す光学装置における撮像光学系 3 0 1 の被写体側の第 1 面から被写体 3 1 4 までの物体距離（撮影距離）、横軸に各電極 4 0 9 b の番号をとったデータ構成となっている。これらの図に示す L U T 中の数値は、各物体距離で各電極 4 0 9 b と電極 4 0 9 k との間に印加する電圧の値を示している。単位はボルトである。この L U T は、図 1 に示す光学装置の L U T データ部 3 1 3 に格納されている。

L U T データ部 3 1 3 は、演算装置 4 1 4 を介して、電子ズームを行なわないときには図 3 A に示す L U T のデータが用いられ、電子ズームを行なうときには図 3 B に示す L U T のデータが用いられるように制御される。

図 3 A に示す L U T のデータは、薄膜 4 0 9 a を変形させることによって撮像素子 4 0 8 の撮像面 3 1 1 全面の像の収差が減るように、表中の電圧が設定されており、図 3 B に示す L U T のデータは、薄膜 4 0 9 a を変形させることによって撮像面 3 1 1 の中心部分 3 1 2 の像の収差が減るように、表中の電圧が設定されている。

本発明の光学装置は、このように構成された L U T を用いるようにしたので、電子ズームを行なった場合でも、鮮鋭度の高い画像を撮像、表示、保存することができる。

なお、図 3 A 及び図 3 B 中の遠点余裕及び近点余裕は、山登り方式（あるいはコントラスト方式とも呼ばれる）のフォトフォーカスを行う場合に、はじめに像のピントを大きくずらして、像のコントラストの低いところを見出し、その状態から L U T を走査して徐々にピントを変えながら像のコントラストが最大になるところを決定していくために用いる値である。

また、図 1 に示す光学装置では、可変ミラー 4 0 9 として静電駆動型の可変ミラーを用いて構成したので、L U T 中の値を電圧値で示してあるが、電磁駆動型の可変ミラーを用いて構成してもよい。その場合には、L U T 中の値を各電極に流れる電流値で示せばよい。なお、本発明では、薄膜 4 0 9 の駆動に用いられる電圧や電流等の値を駆動情報と呼ぶこととする。

また、図 1 に示す光学装置では、可変ミラー 4 0 9 を用いて構成したが、これに限らず、収差を変化させることができる可変焦点レンズや可変プリズム等の光学特性可変光学素子と電子ズームとを組み合わせるズーム動作させるようにしてもよい。

可変焦点レンズは、例えば図 3 6 に示すようなものがある。図 3 6 に示す可変焦点レンズ 5 1 1 において、電極 5 1 3 a 又は電極 5 1 3 b を複数に分割しておけば、図 1 に示した光学装置と同様に画像として使用される像の部分についての収差を低減することができる。

また、第 1 実施例の光学装置は、図 3 A 及び図 3 B の L U T から得られた数値を補間して最適な駆動情報が得られるように構成してもよい。

また、図 3 A 及び図 3 B の L U T 中の値を決める場合、撮像光学系 3 0 1 の設計値を用いてもよいが、その代わりに、光学装置 3 0 2 の製造時に、製造誤差を含めて、撮像光学系 3 0 1 によってつくられる像の収差あるいは M T F 等が最良になるように L U T 中の値を決めてもよい。そのようにすれば、設計値だけを用いて L U T 中の値を決める場合よりも更に精度の高い光学装置が実現できる。

具体的には、例えば物体としてテストチャート 3 1 4 をいくつかの物体距離に置き、光学装置 3 0 2 で撮像し、電子ズームを行うとき、電子ズームを行わないときのそれぞれについて、それぞれ物体距離に置かれたテストチャート 3 1 4 のコントラストが最良になるように、L U T の値を決めて L U T データ部 3 1 3 に格納すれば良い。

また、第 1 実施例の光学装置においては、温度や湿度の変化、経時変化、手振れ、振動等による像の振れ等を原因とする光学装置の結像性能の低下に対しても、例えば、L U T を用いて、電子ズームを行う際における結像性能の向上を合わせて行うようにしても良い。

また、像の振れ補正は、演算装置 4 1 4 に接続された振れセンサー 4 2 4 で光学装置の振れを検出し、その振れがキャンセルされるように薄膜 4 0 9 a の形状を駆動回路 3 0 4 を介して変形させれば良い。さらに、画像処理装置 3 0 3 には、振れ補正用の駆動情報を設けておけば良い。

また、図 1 に示す光学装置では、撮像光学系 3 0 1 を単焦点の光学系で構成したが、光学式ズーム光学系で構成することも可能である。その場合には、電子ズームに加えてさらに大きなズーム比の光学装置が得られる。但し、撮像光学系 3 0 1 を光学式ズーム光学系で構成すると、光学装置の機械的寸法が大きくなってしまう。しかしながら、その場合でも、図 2、図 3 A 及び図 3 B を用いて説明したような電子ズーム時の収差補正手段として L U T を適用することで、鮮鋭度の高い画像が得られる。

その場合の L U T は、図 3 A 及び図 3 B に示したデータに加えて、望遠、標準、広角の各光学ズーム状態ごとに図 3 A 及び図 3 B に示した駆動情報を備えたデータを持つようにすればよい。あるいは、光学式ズームにおける望遠状態のみについて電子ズームを行なう場合には、光学式ズームにおける望遠状態のみについて、図 3 A 及び図 3 B に示した駆動情報を備えたデータを持つようにしてもよい。

さらに、電子ズームの拡大率を複数種類変えて行う場合には、拡大率に応じて図 3 A および図 3 B に示したような駆動情報を備えたデータ群を拡大率の種類に応じて持つようにしてもよい。例えば、電子ズームの拡大率を 4 通り変えて行うためには、4 通りの駆動情報を備えたデータ群を持つようにすれば良い。

また、電子ズームで拡大する領域は、図 2 に撮像面 3 1 1 の中心部分 3 1 2 として示したような結像範囲の中央付近に限らず、図 4 に示すように、例えば、撮像面 3 1 1 を 4 分割した一部分 3 1 5 のように、任意の部分を対象としてもよい。その場合には、この一部分 3 1 5 の領域において撮像光学系 3 0 1 で生じる収差が低減するように、図 3 A 及び図 3 B に示したような駆動情報を備えたデータを持つようにして可変ミラー 4 0 9 を制御すればよい。

次に、電子ズーム倍率について説明する。電子ズーム倍率は、高くしすぎると、画像が粗くなるので好ましくなく、一方、低くしすぎると、電子ズームを採用することによる効果が出ない。ここで、撮像素子の画素数を M とし、電子ズーム倍

率を $\beta_E$ とすると、電子ズーム倍率 $\beta_E$ は次の条件式(1)を満足するのが好適である。

$$1.05 < \beta_E < 30 \times \sqrt{(M/10^6)} \quad \cdots (1)$$

条件式(1)の上限值が $\sqrt{M}$ に比例しているのは、画素数が多くなるほど拡大しても画像の粗さが目立たなくなるからである。

さらに、次の条件式(1')を満足すると、画像の粗さが目立たず、画像拡大効率も大きくなるので好ましい。

$$1.1 < \beta_E < 15 \times \sqrt{(M/10^6)} \quad \cdots (1')$$

また、次の条件式(2)を満足すると、印刷等をして粗さの目立ちにくい画像が得られるので好ましい。

$$M \geq 20 \text{ 万} \quad \cdots (2)$$

また、図1に示す光学装置において、撮像光学系301がパンフォーカスの場合、つまり物体距離が変化してもピント調整が不要の場合には、電子ズームを行うときの収差向上のためのみに可変ミラー409を制御するようにしてもよい。その場合、図3A及び図3Bに示したLUTの駆動情報を備えたデータは、縦軸の変数値が1つ又はそれに近い若干の個数に減ることになる。

その他、第1実施例の光学装置は、図1に示すように、光学装置302に例えば携帯電話のような電話機能316を備えると便利である。また、携帯電話に本実施例の光学装置302を組み込んでもよい。そのようにすれば、小型でズーム可能な撮像ができ、かつ、鮮鋭度の高い画像が得られるので、とても良い。

図5は本発明の第2実施例を示す概略構成図である。第2実施例の光学装置302は、第1実施例の光学装置302とは撮像光学系301の構成のみが異なっている。すなわち、第2実施例の撮像光学系301は、物体側より順に配置された、凹レンズ309と、可変ミラー409と、明るさ絞り521と、凸レンズ901と、1群2枚の凸レンズ群902と、凸レンズ310とで構成されている。

第2実施例の光学装置302に用いられる可変ミラー409、可変ミラー409の薄膜409aの形状を制御する演算制御手段、撮像素子の撮像面に結像された被写体像を電子ズームを行って拡大表示する電子ズーム表示手段は、第1実施例と同じであるので、説明は省略する。第2実施例の光学装置においても、第1

実施例の光学装置と同様の作用効果が得られる。

図 6 は本発明の第 3 実施例を示す概略構成図である。第 3 実施例の光学装置 3 2 1 は、撮像光学系が光学式ズーム光学系 3 2 0 で構成されており、第 1 実施例の光学装置 3 2 0 とは撮像光学系の構成のみが異なっている。そして、第 3 実施例の光学装置 3 2 1 は、光学式ズーム光学系 3 2 0 に第 1 実施例において説明した電子ズームを組み合わせで構成されている。なお、第 1 実施例の光学装置と共通の部分、すなわち、信号処理回路 3 0 8、駆動回路 3 0 4 以下の部分は図 6 では省略してある。

光学式ズーム光学系 3 2 0 は、物体側より順に配置された、凹レンズ 3 2 2 と、可変ミラー 4 0 9 と、レンズ群 3 2 3 と、位置固定のレンズ群 3 2 4 と、明るさ絞り 5 2 1 と、レンズ群 3 2 5 と、レンズ群 3 2 6 とで構成されている。レンズ群 3 2 3 は変倍群、及びレンズ群 3 2 5 はコンペンセータであり、それぞれ、ズーム時に光軸方向（図 6 の矢印方向）に沿って移動するようになっている。可変ミラー 4 0 9 は、物体距離が変化したときのピント合わせ、及びズーム時にコンペンセータ 3 2 5 で補正しきれないピントの移動を補正するように構成されている。レンズ群 3 2 6 は、レンズ群 3 2 3 及びレンズ群 3 2 5 と共に光軸方向に移動可能にすると、後述するような有用性が得られる。これらのレンズ群 3 2 3、3 2 5、3 2 6 は、演算装置 4 1 4 により制御される駆動装置 3 2 7 を介して駆動される。

また、第 3 実施例の光学装置 3 2 1 は、第 1 実施例の光学装置 3 2 0 と同様、電子ズームを行う場合には、撮像素子 4 0 8 のうちの画像として利用する領域の鮮鋭度が向上するように、薄膜 4 0 9 a の形状を最適化して撮像が行われるようになっている。

また、第 3 実施形態の光学装置 3 2 1 は、可変ミラー 4 0 9 を形状の変化しないミラーに置き換え、レンズ群 3 2 6 を光軸方向（図 6 の矢印方向）に沿って移動させることで、電子ズームを行ったときの画像として利用する領域の鮮鋭度を向上させるようにしてもよい。つまり、3つのレンズ群 3 2 3、3 2 5、3 2 6 を動かすことができるようにすると、変倍、変倍に伴うピント移動の補正の他に収差を調整する自由度を持つことができる。このため、電子ズームを行なうとき



にレンズ群 3 2 3, 3 2 5, 3 2 6 を連携して光軸方向に沿って移動させることにより、鮮鋭度の高い画像を得ることができる。

なお、第 3 実施例の光学装置 3 2 1 は、図 6 に示すように可変ミラー 4 0 9 を有した構成の場合には、可変ミラー 4 0 9 の形状を変化させながらコンペンセータをなすレンズ群 3 2 5、レンズ群 3 2 6、変倍群をなすレンズ群 3 2 3 のうちの少なくとも 1 つを光軸方向（図 6 の矢印方向）に沿って移動させることで、光学式ズーム倍率を必要な値に保ち、物体に対するピント合わせを行いながら、電子ズームによって利用する画像範囲についてのみ鮮鋭度が向上するようにしてもよい。このようにすると、像の収差の補正に対する自由度が増えるので鮮鋭度の高い画像が得られる。

図 7 は本発明の第 4 実施例を示す概略構成図である。第 4 実施例の光学装置 3 3 1 は、形状の変わらないミラー 3 3 0 に電子ズーム機能を備えて構成されている。そして、第 4 実施例の光学装置では、2 つの光学素子群（レンズ群 3 3 2 とレンズ群 3 2 6）を光軸方向（図 7 の矢印方向）に沿って連携して移動させることによって、電子ズームを行ったときの収差の向上と物体距離が変化したときのピント合わせとを行なうように、演算装置 4 1 4 により駆動装置 3 2 7 が駆動制御されるように構成されている。

また、電子ズームを行なうときには、撮像素子 4 0 8 における画像として利用する領域のみの鮮鋭度が向上するように、物体距離に応じてレンズ群 3 3 2, 3 3 6 を光軸方向（図 7 の矢印方向）に沿って連携して移動させるように、演算装置 4 1 4 により駆動装置 3 2 7 が制御されるように構成されている。

なお、第 4 実施例の光学装置 3 3 1 は、図 7 に示した形状の変わらないミラー 3 3 0 の代わりに図 1 に示したような可変ミラー 4 0 9 を用いて構成しても良い。その場合、レンズ群 3 3 2 及びレンズ群 3 2 6 のうちの一方は固定してもよい。可変ミラー 4 0 9 と、レンズ群 3 3 2 及びレンズ群 3 2 6 のうちのいずれか一方を電子ズームを行うときに連携して駆動させることで、電子ズームを行なうときに利用する領域の画像の鮮鋭度を向上させることができる。

また、パンフォーカスの光学系として構成する場合には、物体距離が変化してもピント位置を補正する必要がないので、レンズ群 3 3 2 及びレンズ群 3 2 6 の

うちの一方を移動させるようにしてもよい。なお、このとき移動するレンズ群の焦点距離は、ほぼ無限大とすればよい。

また、第4実施例の光学装置331は、電子ズームを行なうのと同時に光学系のFnoを明るくするために、絞りを開くようにしても良い。これは、Fnoを明るくすることで回折限界周波数を増加させ、像の鮮鋭度を向上させることができるからである。また、露出時間が短縮できるので手ブレが減ってよい。これにあわせて可変ミラー409の面形状を最適化すれば、さらに像の鮮鋭度を向上させることができるのでなおよい。電子ズーム時に明るさ絞りを開くことは、光学特性可変素子を有しない撮像装置、光学装置で行なってももちろんよい。

図8は本発明の第5実施例を示す概略構成図である。第5実施例の光学装置は、光学特性可変光学素子としての可変ミラー409を備えた観察光学系900と、光学特性可変光学素子としての可変焦点レンズ403dを備えた撮像光学系403と、撮像光学系403によって記録素子としての撮像素子408に記録した画像を画像処理によって拡大する電子ズーム機能とを備えている。この構成は、ケプラー式ファインダーを有するデジタルカメラに適用できる。また、銀塩フィルムカメラにも適用できる。なお、銀塩フィルムカメラの場合は、電子ズームはできないが、フィルムの一部分だけを拡大して印画紙に焼き付けするようにしてもよい。あるいはフィルムスキャナーでフィルムを読み込み、画像の必要な部分だけを拡大して使用するようにしても良い。

第5実施例の光学装置は、例えば、観察光学系900で物体（被写体）を広い範囲で観察して撮像する物体像（被写体像）の範囲を定め、その結果に基づいて撮像光学系403で物体像を撮像素子408に記録するとともに、この記録した物体像を電子ズームによって拡大することができるようになっている。そして、この光学装置では、電子ズームを行なうときに、撮像素子408に結像される物体像の中心付近の鮮鋭度が高くなるように、撮像光学系403の中に配置された可変焦点レンズ403dが変形するように、ピント合わせの場合を含めて駆動回路304で駆動される。駆動回路304は、図1において説明した演算装置（マイクロプロセッサ）414に接続されている。

観察光学系900は、図8に示すように、対物レンズ902と、接眼レンズ9

01と、プリズム404と、二等辺直角プリズム405と、ミラー406と、可変ミラー409とで構成されている。

可変ミラー409は、輪帯状の支持台423の上面に支持された変形自在な3層構造体からなり、表面層が反射面となる薄膜409aと、薄膜409aを支持する中間の基板409jと、下層の薄い電極409kと、支持台423の下方側に電極409kに対し所定の間隔を設けて配置した複数の電極409bとを有している。電極409kと複数の電極409bは、電極409kと複数の電極409bとの間に選択的に所定の電圧を印加して薄膜409aの形状を変形させるように電圧制御可能な可変抵抗器を備えた駆動回路304bに接続されている。駆動回路304bは、演算装置（マイクロプロセッサ）414に接続されている。

このように構成された観察光学系900によれば、物体からの光は、対物レンズ902及びプリズム404の各入射面と射出面で屈折し、可変ミラー409の反射面である薄膜409aで反射し、プリズム404を通過し、二等辺直角プリズム405でさらに反射し、ミラー406で反射し、接眼レンズ901を介して観察者の瞳に結像される。（なお、図中、光路上の×印は、紙面の裏側に向って光線が進むことを示している。）

この観察光学系900においては、撮像予定範囲よりも広い範囲（撮像予定画角よりも大きい画角の範囲）を観察しながら、その後に撮像する物体像（被写体像）の範囲（撮像予定画角）を絞り込んで定める際に、演算装置414の制御により駆動回路304bを介して可変ミラー409の薄膜409aの形状を拡張曲面として変形させ、かつ、観察者の視度に合わせたピント調整を行うとともに、レンズ901、902及び／又はプリズム404、二等辺直角プリズム405、ミラー406の温度や湿度の変化による変形や屈折率の変化、あるいはレンズ枠の伸縮や変形及び光学素子、枠等の部品の組立誤差による結像性能の低下を抑制し、常に適正にピント調整並びにピント調整で生じた収差の補正を行うようになっている。

一方、撮像光学系403は、物体側から順に配置された、第1レンズ403aと、第2レンズ403bと、絞り403cと、焦点距離を変化させることができ且つ光学系403内の収差補正とピント合わせ等が可能な第3レンズとしての可

変焦点レンズ４０３ｄと、第４レンズ４０３ｅとで構成されている。撮像光学系４０３の後方には、撮像素子４０８が配置されている。

撮像光学系４０３では、観察光学系９００で絞り込まれた物体像の範囲（撮像予定画角）の情報に基づいて、撮像光学系４０３中の可変焦点レンズ４０３ｄの形状を演算装置４１４の制御により駆動回路３０４を介して適宜な拡張曲面に変形させ、撮像素子４０８に結像する前記絞り込まれた物体像の中心付近の鮮鋭度が高くなるように設定されている。

従って、図８に示した光学装置においては、観察光学系９００を介して絞り込まれた物体像の範囲の情報に基づいて、撮像光学系４０３で撮像素子４０８に画像を記録するとともにこの記録された画像に対して、図１に示した構成と同様に、信号処理装置３０８及び画像処理装置３０３を介して電子ズームを行い、表示装置３０６に表示するとき、撮像素子４０８に結像される物体像（被写体像）の中心付近の鮮鋭度が高くなるように、可変焦点レンズ４０３ｄのレンズ面の形状を変化させる、あるいは屈折率を変化させるように駆動回路３０４で駆動するように構成されている。

このように構成された第５実施例の光学装置によれば、光学装置の観察光学系及び撮像光学系のいずれにも、ズーム操作のためにレンズ系の一部を光軸に沿って動かす必要がなく、また、電子ズームを行なう際にも、収差が十分に小さくなるように制御された状態で記録素子としての撮像素子４０８に画像が記録される。このため、光学装置を小型化でき、かつ、ズーム比を大きくしても画像の鮮鋭度が高い光学装置が得られる。

なお、図８に示した光学装置において、観察光学系９００のプリズム４０４と可変ミラー４０９は一体的に形成してユニット化すると、組み立て上便利である。また、レンズ９０１、９０２、プリズム４０４、４０５、ミラー４０６はプラスチックモールド等で形成すると、任意の所望形状の曲面を容易に形成することができ、製作も簡単であるので好ましい。

また、図８に示した光学装置では、レンズ９０１、９０２がプリズム４０４から離れて設けられているが、レンズ９０１、９０２を設けることなく収差を除去することができるように、プリズム４０４、４０５、ミラー４０６、可変ミラー

409を設計してもよい。このように構成すれば、プリズム404、405、可変ミラー409は、1つの光学ブロックとなり、組立が容易となる。

また、レンズ901、902、プリズム404、405、ミラー406の一部あるいは全部をガラスで作製してもよい。このように構成すれば、さらに精度の良い観察光学系が得られる。また、可変ミラー409の反射面の形状は自由曲面にするのがよい。自由曲面にすれば、収差補正が容易にでき有利である。

なお、対物レンズ902、接眼レンズ901、及びプリズム404、二等辺直角プリズム405、ミラー406の各面は、平面、球面、回転対称非球面その他、光軸に対して偏心した平面、球面、回転対称非球面、あるいは、対称面を有する非球面、対称面を1つだけ有する非球面、対称面のない非球面、自由曲面、微分不可能な点又は線を有する面等のいかなる形状、いわゆる拡張曲面のいずれでもよい。

次に、本発明の光学装置に適用可能な光学系の実施例を説明する。

#### 実施例 1

図9は本発明の光学装置に適用可能な光学系の第1実施例のY-Z断面図、図10は第1実施例の物点距離無限遠における横収差図、図11は第1実施例の物点距離150mmにおける横収差図である。図9中の矢印は各光学部材の偏心の方向を示している。

第1実施例の光学系は、図9に示すように、形状可変ミラーDMと、形状可変ミラーから物体側に配置されていて物体側に凸面を向けた負メニスカスレンズで構成された1群1枚の凹レンズ群G1と、形状可変ミラーから像側に配置された明るさ絞りSと、さらに像側に配置されていて両凸正レンズと両凹負レンズとの接合レンズと、両凸正レンズとで構成された3群4枚の凸レンズ群G2と、その後方に配置されたローパスフィルター、赤外カットフィルターからなるフィルター群FLと、撮像素子のカバーガラスCGとで構成されている。そして、形状可変ミラーDMの反射面を形成する薄膜が変形することで、無限遠から近点150mmまでフォーカシングを行うことができるようになっていく。この光学系の構成は、図1に示した本発明の第1実施例の撮像光学系301の構成に対応している。

第1実施例の光学系において、形状可変ミラーDMが平面から曲面に変形すると、ミラー面の反射によって偏心収差が発生し、特に形状可変ミラーDMの変形量が多い近点合焦時に偏心収差は増大して発生するので、遠点から近点まで良好な光学性能を得るために、レンズ群あるいは撮像面にシフト及びティルトの偏心を加えて固定されている。これにより、フォーカシング時の偏心収差の発生をバランスさせている。また、第1実施例の光学系は、少なくとも1つの形状可変ミラーDMを有し、該形状可変ミラーの変形のみでフォーカシングが可能ないように構成されている。

第1実施例の光学系は、このように構成されているので、フォーカシング時にレンズを駆動する必要がない。従って、消費電力が非常に小さく、動作音が静かで、機械的構造が簡単な、コンパクトかつ低コストの光学系及び光学装置を実現できる。

前記形状可変ミラーDMは、前記レンズ群あるいは撮像面に加えたシフト及びティルトの偏心によっても、フォーカシング時の偏心収差のバランスがとれないときに、偏心収差を低減するために所定の状態で回転非対称な形状に変形するように制御される。

この制御により、全てのフォーカシング領域で良好な結像性能を得ることができる。形状可変ミラーは、変形してパワーを持った際、反射面が入射光に対して偏心しているため、反射時に偏心収差が発生する。この偏心収差を補正するために前記レンズ群あるいは撮像面に加えるシフト及びティルトの偏心に加えて、形状可変ミラーは回転非対称な形状に変形することが望ましい。

なお、レンズ群あるいは撮像面にシフト及びティルトを加えて偏心するのではなく、形状可変ミラーDMが単独で偏心収差を補正するように、形状可変ミラーDMの反射面の形状を変形させるようにしてもよい。

また、第1実施例の光学系は、偏心収差を補正するために、少なくとも1つの回転対称なレンズ、あるいはレンズ群、あるいは撮像面が、Z軸に対してシフト又はティルトの偏心をして配置されている。

このように配置すると、形状可変ミラーはそのパワーが強くなるにつれて偏心収差の残存量が増大するが、そのような場合でも、良好な光学性能を得るこ

とが可能となる。なお、本発明の光学装置及び光学装置に適用する光学系における偏心とは、シフト及びティルトのことを指す。

また、第1実施例の光学系によれば、前記形状可変ミラーDMは、フォーカシングする物体距離が近くなるにつれて正のパワーが大きくなるように構成されている。このように構成したので、遠点から近点までの広範囲で良好な光学性能を得ることができる。なお、本明細書において、パワーの符号は、収束作用を持つ場合をプラス、発散作用を持つ場合をマイナスとして定義する。つまり、形状可変ミラーでは凹面の変形量が大きいほど正のパワーを持つことになる。また、前記形状可変ミラーDMは、正のパワーのみを持つことができるように構成されている。このように構成したので、機械的構造や電氣的構造が簡単になり、低コストの形状可変ミラーを提供することができる。

なお、前記形状可変ミラーDMは、変形により正のパワーと負のパワーの両方を持つことができるように構成してもよい。このように構成すると、形状可変ミラーの偏心収差の発生を抑制し、且つ、良好な光学性能を得ることができる。即ち、形状可変ミラーは、パワーが増大するにつれて変形量が大きくなり、それにより偏心収差が発生し、光学性能が劣化してしまうが、形状可変ミラーが正のパワーと負のパワーの両方を持つことで変形量が抑えられて、偏心収差の発生を抑制し、且つ、良好な光学性能を得ることができる。

また、前記形状可変ミラーDMは、ミラー面の変形の際にミラー面を形成する薄膜の周辺部が輪帯状の部材の頂部に固定であるように構成されている。また、本発明の実施に適用可能な光学系及びそれを用いた光学装置は、少なくとも1つ以上の接合レンズを有するように構成されている。この構成により、各レンズ群で発生する色収差を良好に補正することができ、さらに光学系のコンパクト化にも寄与することができる。

また、本発明の実施に適用可能な光学系及びそれを用いた光学装置は、形状可変ミラーの最大変形量を $m d$ 、光学系の焦点距離を $f$ としたときに、所定の状態で次の条件式(3)を満足することを特徴としている。

$$0 < |m d / f| < 0.1 \quad \dots (3)$$

ただし、本発明では、光学系の焦点距離 $f$ は、形状可変ミラーが平面形状にお

ける光学系の焦点距離として定義する。

このように構成すれば、形状可変ミラーの変形量を適正な範囲に抑えることができる。即ち、上記条件式(3)の上限値を上回ると、形状可変ミラーの変形量が大きくなりすぎて偏心収差の発生量が増大し、所望の光学性能を満足することが難しくなる。さらに、製造上の難易度が高くなる。

また、本発明の実施に適用可能な光学系及びそれを用いた光学装置は、所定の状態で次の条件式(3')を満足するのが好ましい。

$$0 < |m d / f| < 0.05 \quad \dots (3')$$

このように構成すれば、さらに偏心収差の発生量を抑えることができる。

さらに、本発明の実施に適用可能な光学系及びそれを用いた光学装置は、所定の状態で次の条件式(3'')を満足するのが好ましい。

$$0 < |m d / f| < 0.03 \quad \dots (3'')$$

このように構成すれば、さらに良好に偏心収差の発生量を抑えることができる。

また、本発明の実施に適用可能な光学系及びそれを用いた光学装置は、形状可変ミラーの最大変形量を $m d$ 、形状可変ミラーにおける光学的に有効な反射面の面積を $S m$ としたときに、所定の状態で次の条件式(4)を満足することを特徴としている。

$$0 < m d^2 / S m < 5.0 \times 10^{-4} \quad \dots (4)$$

このように構成すれば、形状可変ミラーの変形量を適正な範囲に抑えることができる。

また、本発明の実施に適用可能な光学系及びそれを用いた光学装置は、所定の状態で次の条件式(4')を満足するのが好ましい。

$$0 < m d^2 / S m < 1.0 \times 10^{-4} \quad \dots (4')$$

このように構成すれば、さらに良好に形状可変ミラーの変形量を適正範囲に抑えることができる。

また、本発明の実施に適用可能な形状可変ミラーを含んだ光学系は、フォーカシングを行う際の形状可変ミラーの駆動方式が静電駆動方式であり、フォーカシング時に形状可変ミラーに印加する電圧を $V m$  (Volt)としたときに、所



定の状態で次の条件式 (5) を満足することを特徴としている。

$$0 \leq |V_m| < 500 \quad \dots (5)$$

このように構成すれば、空気放電の危険性を低減させ、且つ、形状可変ミラーの変形量を大きくすることができる。

また、本発明の実施に適用可能な光学系及びそれを用いた光学装置は、形状可変ミラーによってフォーカシングを行う際に、形状可変ミラーの駆動方式が静電駆動方式であり、フォーカシング時に形状可変ミラーに印加する電圧を  $V_m$  (Volt) としたときに、所定の状態で次の条件式 (5') を満足するのが好ましい。

$$0 \leq |V_m| < 300 \quad \dots (5')$$

このように構成すれば、消費電力を低減させることができるので、さらに良い光学系及び光学装置を提供できる。

また、本発明の実施に適用可能な光学系及びそれを用いた光学装置は、形状可変ミラーのパワーに比例する量を  $\phi_{DM}$ 、光学系の焦点距離を  $f$  としたときに、所定の状態で次の条件式 (6) を満足することを特徴としている。

$$0 \leq |\phi_{DM} \times f| < 1.00 \quad \dots (6)$$

ただし、前記形状可変ミラーのパワーに比例する量  $\phi_{DM}$  は、前記形状可変ミラーの偏心方向 (Y 方向) 面内でのパワーに比例する量  $\phi_{DMy}$  と、それと直交する方向 (X 方向) 面内でのパワーに比例する量  $\phi_{DMx}$  との平均値であり、 $\phi_{DM} = (\phi_{DMx} + \phi_{DMy}) / 2$  と定義される。なお、本願では、後述するパワー成分である  $C_4$ 、 $C_6$  を用いて、 $\phi_{DMx} = C_4$ 、 $\phi_{DMy} = C_6$  で定義される。

このように構成すれば、形状可変ミラーのフォーカシング作用を満足に得ることができ、さらに形状可変ミラーで発生する偏心収差を適正な範囲で抑えることができる。

また、本発明の実施に適用可能な光学系及びそれを用いた光学装置は、所定の状態で次の条件式 (6') を満足するのが好ましい。

$$0 \leq |\phi_{DM} \times f| < 0.50 \quad \dots (6')$$

このように構成すれば、さらに形状可変ミラーで発生する偏心収差を抑えることができる。

また、本発明の実施に適用可能な光学系及びそれを用いた光学装置は、所定の状態で次の条件式(6'')を満足するのが好ましい。

$$0 \leq |\phi DM \times f| < 0.10 \quad \dots (6'')$$

このように構成すれば、さらに良好に形状可変ミラーで発生する偏心収差を抑えることができる。

また、本発明の実施に適用可能な光学系及びそれを用いた光学装置は、前記形状可変ミラーによって遠点にフォーカシングした際に、形状可変ミラーが、フォーカシングした状態のパワーよりも小さいパワーの状態に変形できることを特徴としている。このように構成すれば、コントラスト方式のオートフォーカスを行うことが可能になる。即ち、形状可変ミラーが遠点合焦時よりも小さいパワーになることで、遠点における像のボケ具合を調節することができる。

また、本発明の実施に適用可能な光学系及びそれを用いた光学装置は、前記形状可変ミラーによって近点にフォーカシングした際に、形状可変ミラーがフォーカシングした状態のパワーよりも大きいパワーの状態に変形できることを特徴としている。このように構成すれば、コントラスト方式のオートフォーカスを行うことが可能になる。即ち、形状可変ミラーが近点合焦時よりも大きいパワーになることで、近点における像のボケ具合を調節することができる。

また、本発明の実施に適用可能な光学系及びそれを用いた光学装置は、前記形状可変ミラーによって物体距離が無限大の物点にフォーカシングした際に、形状可変ミラーの形状が平面ではなく、ゼロよりも大きなパワーを持つ凹面形状に変形することを特徴としている。

また、本発明の実施に適用可能な光学系及びそれを用いた光学装置は、形状可変ミラーの物体側に負パワーのレンズ群を有し、該レンズ群の焦点距離を  $f_1$ 、光学系の焦点距離を  $f$  としたときに、次の条件式(7)を満足することを特徴としている。

$$-5.0 < f_1 / f < -0.2 \quad \dots (7)$$

このように構成すれば、形状可変ミラーの小型化、低コスト化、及び良好な光学性能を得ることができる。即ち、条件式(7)の下限値を下回ると、負レンズ群

のパワーが非常に弱くなり、広角端における形状可変ミラーの軸外光線高を小さくすることができず、形状可変ミラーの大型化につながり、コスト高を招く。また、条件式(7)の上限値を上回ると、負レンズ群のパワーが強くなりすぎ、そのレンズ群で発生するコマ収差や倍率の色収差を補正することが困難になる。

また、本発明の実施に適用可能な光学系及びそれを用いた光学装置は、次の条件式(7')を満足するのが好ましい。

$$-2.5 < f_1 / f < -0.5 \quad \dots (7')$$

このように構成すれば、良好な光学性能を確保し、且つ、さらに形状可変ミラーの小型化を実現できる。

また、本発明の実施に適用可能な光学系及びそれを用いた光学装置は、形状可変ミラーの物体側に配置された負パワーのレンズ群が、1枚の凹レンズで構成されていることを特徴としている。このように構成すれば、形状可変ミラーから物体側のレンズが1枚だけであるので、コンパクトで薄型の光学系を実現することができる。

また、本発明の実施に適用可能な光学系及びそれを用いた光学装置は、形状可変ミラーによる軸上主光線の折り曲げ角を $\theta$ としたときに、次の条件式(8)を満足することを特徴としている。

$$60^\circ < \theta < 140^\circ \quad \dots (8)$$

条件式(8)の下限値を下回ると、形状可変ミラーの長手方向のサイズが大きくなってしまい、低コスト化が困難になる。また、条件式(8)の上限値を上回ると、ミラーのサイズは小さくなるが、形状可変ミラーの前後のレンズ群が干渉し、光学系の配置が難しくなる。軸上主光線とは、物体中心を出て絞り中心を通り、像中心に到達する光線のことを指す。通常、軸上主光線を光軸と呼ぶ。

また、本発明の実施に適用可能な光学系及びそれを用いた光学装置は、次の条件式(8')を満足するのが好ましい。なお、次の条件式(8'')を満足すれば、より好ましい。

$$60^\circ < \theta < 120^\circ \quad \dots (8')$$

$$75^\circ < \theta < 105^\circ \quad \dots (8'')$$

このように構成すれば、さらに良い結果が得られる。

また、本発明の実施に適用可能な光学系及びそれを用いた光学装置は、前記形状可変ミラーよりも像側のレンズ群、すなわち前記形状可変ミラーの直後の光学面から最終面までのレンズ群の倍率を $\beta 1$ としたときに、次の条件式(9)を満足することを特徴としている。

$$0.2 < |\beta 1| < 1.50 \quad \dots (9)$$

条件式(9)の下限値を下回ると、形状可変ミラー以降のレンズ群の倍率が低すぎるので、形状可変ミラーにおけるフォーカス感度が低下し、フォーカシングに必要な形状可変ミラーの変形量が増大してしまう。一方、条件式(9)の上限値を上回ると、レンズ群の倍率が高すぎるので形状可変ミラーで発生する偏心収差が拡大され、満足な光学性能を得ることが難しくなる。

また、本発明の実施に適用可能な光学系及びそれを用いた光学装置は、次の条件式(9')を満足するのが好ましい。なお、次の条件式(9'')を満足すれば、より好ましい。

$$0.35 < |\beta 1| < 1.50 \quad \dots (9')$$

$$0.50 < |\beta 1| < 1.20 \quad \dots (9'')$$

このように構成すれば、光学性能を確保し、且つ、形状可変ミラーの変形量を適正な範囲で抑えられるので、さらに良い結果が得られる。

また、本発明の実施に適用可能な光学系及びそれを用いた光学装置は、光学系の全長を $Cj$ 、光学系の焦点距離を $f$ としたときに、次の条件式(10)を満足することを特徴としている。

$$1.0 < Cj/f < 20.0 \quad \dots (10)$$

条件式(10)の上限値を上回ると、光学系の全長が長くなりすぎ、コンパクト化が困難になる。一方、条件式(10)の下限値を下回ると、コンパクト化は達成できるが、レンズ群の配置が制限され、十分な光学性能を得ることができない。

また、本発明の実施に適用可能な光学系及びそれを用いた光学装置は、次の条件式(10')を満足するのが好ましい。

$$3.0 < Cj/f < 15.0 \quad \dots (10')$$

このように構成すれば、コンパクトな光学系でありながら、より高い光学性能

を得ることができる。

また、本発明の実施に適用可能な光学系及びそれを用いた光学装置は、次の条件式(10')を満足する好ましい。

$$5.0 < C_j / f < 10.0 \quad \dots (10')$$

このように構成すれば、コンパクトな光学系でありながら、さらに良い光学性能を得ることができる。

また、本発明の実施に適用可能な光学系及びそれを用いた光学装置は、形状可変ミラーによって発生する偏心収差を補正するために、少なくとも1つのレンズにシフトを加え、そのシフト量を $\delta$ 、光学系の焦点距離を $f$ としたときに、所定の状態で次の条件式(11)を満足することを特徴としている。

$$0.0 \leq |\delta / f| < 1.00 \quad \dots (11)$$

このように構成すれば、レンズに加える偏心量を適正な範囲で抑えることができ、形状可変ミラーのパワーが弱い場合と強い場合の光学性能のバランスを取ることができる。ここでのシフト量 $\delta$ とは、シフトを加えたレンズの中心軸と光学系のZ軸との距離として定義される量である。

また、本発明の実施に適用可能な光学系及びそれを用いた光学装置は、所定の状態で次の条件式(11')を満足するのが好ましい。

$$0.0 \leq |\delta / f| < 0.50 \quad \dots (11')$$

このように構成すれば、遠点合焦時と近点合焦時の性能をさらに良くすることができる。

また、本発明の実施に適用可能な光学系及びそれを用いた光学装置は、所定の状態で次の条件式(11'')を満足するのが好ましい。

$$0.0 \leq |\delta / f| < 0.25 \quad \dots (11'')$$

このように構成すれば、遠点合焦時と近点合焦時の性能をさらにより一層良くすることができる。

また、本発明の実施に適用可能な光学系及びそれを用いた光学装置は、形状可変ミラーによって発生する偏心収差を補正するために、少なくとも1つのレンズあるいは撮像面にティルトを加え、そのティルト量を $\varepsilon$ としたときに、所定の状態で次の条件式(12)を満足することを特徴としている。

$$0.0^{\circ} \leq |\varepsilon| < 10.0^{\circ} \quad \cdots (12)$$

このように構成すれば、レンズに加える偏心量を適正な範囲で抑えることができ、形状可変ミラーのパワーが弱い場合と強い場合の光学性能のバランスを取ることができる。なお、ティルト量  $\varepsilon$  とは、ティルトを加えたレンズあるいは撮像面の中心軸と光学系の Z 軸との傾き角として定義される量である。

また、本発明の実施に適用可能な光学系及びそれを用いた光学装置は、所定の状態で次の条件式 (12') を満足するのが好ましい。

$$0.0^{\circ} \leq |\varepsilon| < 7.0^{\circ} \quad \cdots (12')$$

このように構成すれば、遠点合焦時と近点合焦時の性能をさらに良くすることができる。

また、本発明の実施に適用可能な光学系及びそれを用いた光学装置は、所定の状態で次の条件式 (12'') を満足するのが好ましい。

$$0.0^{\circ} \leq |\varepsilon| < 5.5^{\circ} \quad \cdots (12'')$$

このように構成すれば、遠点合焦時と近点合焦時の性能をさらにより一層良くすることができる。

また、本発明の実施に適用可能な光学系及びそれを用いた光学装置は、それぞれのレンズあるいは撮像面に加えたティルト量の絶対値の中で、撮像面のティルト量の絶対値が最大であることを特徴としている。

また、本発明の実施に適用可能な光学系及びそれを用いた光学装置は、撮像面に加えたティルトの方向が、形状可変ミラーと平行に近づく方向であることを特徴としている。

また、本発明の実施に適用可能な光学系及びそれを用いた光学装置は、形状可変ミラーの変形によって発生する偏心収差を補正するために、少なくとも 1 つのレンズあるいは撮像面にシフト及びティルトを加えた光学系において、それぞれのシフトがある一つの平面内で行われ、かつ、ティルトの回転軸がその平面に垂直であることを特徴としている。

また、本発明の実施に適用可能な光学系及びそれを用いた光学装置は、明るさ絞りが形状可変ミラーよりも像側に配置されていることを特徴としている。

次に、本発明の実施に適用可能な光学系の中の形状可変ミラー D M の反射面

の形状、即ち、以下の式（a）で定義される自由曲面（F F S）について述べることにする。この定義式のZ軸が自由曲面の軸となる。

$$Z = c r^2 / [1 + \sqrt{1 - (1 + k) c^2 r^2}] + \sum_{j=2}^N C_j X^m Y^n \quad \dots (a)$$

ここで、上記（a）式の第1項は球面項、第2項は自由曲面項である。球面項中、cは頂点の曲率、kはコーニック定数（円錐定数）、 $r = \sqrt{X^2 + Y^2}$ 、Nは2以上の自然数、mは0以上の整数、nは0以上の整数である。

自由曲面項は、

$$\begin{aligned} & \sum_{j=2}^N C_j X^m Y^n \\ &= C_2 X + C_3 Y \\ &+ C_4 X^2 + C_5 X Y + C_6 Y^2 \\ &+ C_7 X^3 + C_8 X^2 Y + C_9 X Y^2 + C_{10} Y^3 \\ &+ C_{11} X^4 + C_{12} X^3 Y + C_{13} X^2 Y^2 + C_{14} X Y^3 + C_{15} Y^4 \\ &+ C_{16} X^5 + C_{17} X^4 Y + C_{18} X^3 Y^2 + C_{19} X^2 Y^3 + C_{20} X Y^4 \\ &+ C_{21} Y^5 \\ &+ C_{22} X^6 + C_{23} X^5 Y + C_{24} X^4 Y^2 + C_{25} X^3 Y^3 + C_{26} X^2 Y^4 \\ &+ C_{27} X Y^5 + C_{28} Y^6 \\ &+ C_{29} X^7 + C_{30} X^6 Y + C_{31} X^5 Y^2 + C_{32} X^4 Y^3 + C_{33} X^3 Y^4 \\ &+ C_{34} X^2 Y^5 + C_{35} X Y^6 + C_{36} Y^7 \\ &\dots \end{aligned}$$

ただし、 $C_j$ （jは2以上の整数）は係数である。

上記自由曲面は、一般的には、X-Z面、Y-Z面共に対称面を持つことはないが、Xの奇数次項を全て0にすることによって、Y-Z面と平行な対称面が1つだけ存在する自由曲面となる。また、Yの奇数次項を全て0にすることによって、X-Z面と平行な対称面が1つだけ存在する自由曲面となる。

また、上記の回転非対称な曲面形状の面である自由曲面は、他の定義式として、Zernike多項式により定義できる。この面の形状は以下の式（b）により定義される。その定義式（b）のZ軸がZernike多項式の軸とな

る。回転非対称面の定義は、 $X-Y$ 面に対する $Z$ の高さの極座標で定義され、 $R$ は $X-Y$ 面内の $Z$ 軸からの距離、 $A$ は $Z$ 軸回りの方位角で、 $Z$ 軸から測った回転角で表せられる。

$$\begin{aligned}
X &= R \cos(A) \\
Y &= R \sin(A) \\
Z &= D_2 \\
&+ D_3 R \cos(A) + D_4 R \sin(A) \\
&+ D_5 R^2 \cos(2A) + D_6 (R^2 - 1) + D_7 R^2 \sin(2A) \\
&+ D_8 R^3 \cos(3A) + D_9 (3R^3 - 2R) \cos(A) + D_{10} (3R^3 - 2R) \sin(A) \\
&+ D_{11} R^3 \sin(3A) \\
&+ D_{12} R^4 \cos(4A) + D_{13} (4R^4 - 3R^2) \cos(2A) \\
&\quad + D_{14} (6R^4 - 6R^2 + 1) + D_{15} (4R^4 - 3R^2) \sin(2A) \\
&+ D_{16} R^4 \sin(4A) \\
&+ D_{17} R^5 \cos(5A) + D_{18} (5R^5 - 4R^3) \cos(3A) \\
&\quad + D_{19} (10R^5 - 12R^3 + 3R) \cos(A) \\
&\quad + D_{20} (10R^5 - 12R^3 + 3R) \sin(A) \\
&\quad + D_{21} (5R^5 - 4R^3) \sin(3A) + D_{22} R^5 \sin(5A) \\
&+ D_{23} R^6 \cos(6A) + D_{24} (6R^6 - 5R^4) \cos(4A) \\
&\quad + D_{25} (15R^6 - 20R^4 + 6R^2) \cos(2A) \\
&\quad + D_{26} (20R^6 - 30R^4 + 12R^2 - 1) \\
&\quad + D_{27} (15R^6 - 20R^4 + 6R^2) \sin(2A) \\
&\quad + D_{28} (6R^6 - 5R^4) \sin(4A) + D_{29} R^6 \sin(6A) \dots \dots \dots \\
&\dots (b)
\end{aligned}$$

ただし、 $D_m$  ( $m$ は2以上の整数)は係数である。なお、 $X$ 軸方向に対称な光学系として設計するには、 $D_4$ ,  $D_5$ ,  $D_6$ ,  $D_{10}$ ,  $D_{11}$ ,  $D_{12}$ ,  $D_{13}$ ,  $D_{14}$ ,  $D_{20}$ ,  $D_{21}$ ,  $D_{22}$ ...を利用する。

上記定義式は、回転非対称な曲面形状の面の例示のために示したものであり、他のいかなる定義式に対しても同じ効果が得られることはいうまでもない。数学的に同値ならば他の定義で曲面形状を表してもよい。



本発明の実施においては、前記（a）式の中のXの奇数時の項を全て0とすることで、Y-Z面と平行な対称面を持つ自由曲面としている。

なお、非球面形状は、光軸方向をZ、光軸に直行する方向をYにとり、円錐係数をk、非球面係数をa、b、c、dとしたとき、次式（c）で表される。

$$Z = (Y^2 / r) / [1 + \{1 - (1 + k) \cdot (Y / r)^2\}^{1/2}] + a y^4 + b y^6 + c y^8 + d y^{10} \quad \dots (c)$$

上記数値データに関する説明は、本発明の各実施例及び各実施例の数値データに共通に適用され得る。

以下の各実施例中、“ASP”は非球面、“FFS”は自由曲面、“DM”は形状可変ミラーを表す。データに記載されていない非球面、自由曲面等に関する項は0である。屈折率、アッペ数はともにd線（波長587.56nm）に対するものを表記してある。長さの単位はmm、角度の単位はdegである。また、各実施例では、最像面側に3枚または2枚の平行平板を挿入しているが、これは撮像素子のカバー用のカバーガラス、このカバーガラスの前方のローパスフィルター、さらに前方のIRカットフィルターを想定したものである。なお、IRカットフィルターをローパスフィルターにコーティングして作製すると2枚の平行平板になる。

各実施例において、物体面における座標系のZ軸は、物体中心を通り、物体面に垂直な直線で定義されている。このZ軸と直交する方向をY軸とし、このY軸、Z軸と右手直交座標系を構成する軸をX軸とする。また、光軸は物体面中心と絞り中心あるいは射出瞳を通る光線の通り道で定義する。従って、光軸は形状可変ミラーの変形と共に変化することになるが、その変化はわずかな場合が多い。従って、各実施例ではZ軸と光軸が略一致している。

偏心面は、その座標系の原点から、その面の面頂位置のシフト（X軸方向、Y軸方向、Z軸方向をそれぞれX、Y、Z）と、その面の中心軸（自由曲面については、前記（a）式のZ軸）のX軸、Y軸、Z軸それぞれを中心とするティルト（それぞれ $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ （deg））で与えられる。偏心を行うときの座標系の原点は、偏心を行う面をk面としたとき、k-1面の面頂位置からZ軸方向に面間隔の分だけ移動した点とする。偏心の順序は、Xシフト、Yシフト、

Z シフト、 $\alpha$  ティルト、 $\beta$  ティルト、 $\gamma$  ティルトの順である。なお、その場合  $\alpha$  と  $\beta$  の正は、X 軸、Y 軸それぞれをマイナス側から見たときの反時計回り方向を、 $\gamma$  の正は Z 軸をマイナス方向から見たときの時計回り方向で定義する。

なお、各実施例において、偏心はディセンタアンドリターン（以下 D A R）とディセンタオンリー（以下 D E O）の 2 種類がある。D A R による偏心では、 $k$  面が偏心していたとき、 $k + 1$  面以降の座標系が、偏心前の  $k$  面の座標系と一致する。 $k + 1$  面の面頂位置は、偏心前の  $k$  面の面頂位置から Z 軸方向に面間隔の分だけ移動した点として定義する。一方、D E O では、 $k$  面が偏心していたとき、 $k + 1$  面以降の座標系は、偏心後の  $k$  面の座標系と一致する。 $k + 1$  面の面頂位置は、偏心後の  $k$  面の面頂位置から Z 軸方向に面間隔の分だけ移動した点として定義する。

また、反射面の座標系の Z 軸正方向は、表面から裏面側に向かう方向になる。従って、反射面が X Y 多項式で表される自由曲面形状に変形している場合、パワー成分である  $C_4$ 、 $C_6$  が正のとき、凸面ミラーになる。つまり、負のパワーを持つミラーになる。逆に、パワー成分である  $C_4$ 、 $C_6$  が負のとき、凹面ミラーになる。つまり、正のパワーを持つミラーになる。また、光線が反射面で反射された後の光学系の座標系は、反射前の座標系を X 軸中心に  $180^\circ$  回転させたものとして定義する。これによって、常に光学系の Z 軸正方向に沿って光線が進行することになる。

前記形状可変ミラーは、遠点から近点までフォーカシングするためにパワーを変えることができるが、コントラスト方式のオートフォーカスを行うために遠点合焦時よりも弱いパワーの状態、及び近点合焦時よりも強いパワーの状態を取れるように設計されている。以下の各実施例では、遠点合焦時よりも弱いパワーの状態を遠点余裕、近点合焦時よりも強いパワーの状態を近点余裕と定義している。つまり、形状可変ミラーは遠点余裕、遠点、近点、近点余裕の 4 状態が存在することになる。

なお、以下の各実施例に示す数値データを有する形状可変ミラーは、実際の製作時の製造誤差による像面の Z 方向のずれ、及び温度変化による像面の Z 方向のずれを考慮して、フォーカス範囲の前後に変形量の余裕を持たせた設計に

なっている。

上記のように、形状可変ミラーにフォーカシングの機能をもたせることにより、メカ的な駆動を行わずにフォーカシングできるので、鏡枠構造が簡単になり、小型化、低コスト化を実現することができる。さらに、フォーカシング時のモータの駆動音がなくなるメリットがある。

図12～図15は第1実施例の光学系により2倍の電子ズームを行った場合の物体-Y方向 $9.67^\circ$ （物体の方向がX： $0.000^\circ$ でY： $-9.67^\circ$ のことをいう）の波動光学的MTF（140本/mm）を示すグラフである。つまり、撮像素子の撮像面のサイズを $2\text{mm} \times 1.5\text{mm}$ と考えて、像の鮮鋭度がこの領域内で向上するように薄膜409aの形状を最適化したときのMTFを示したグラフが、図12（物体距離 $\infty$ ）、図13（物体距離15cm）である。なお、撮像素子のピクセルサイズは2.5ミクロン、画素数 $M=200$ 万である。電子ズーム倍率 $\beta_E=2$ で式(1)、(1')を満足している。

比較用に薄膜409aの形状を最適化しないときのMTFを図14（物体距離 $\infty$ ）、図15（物体距離15cm）に示す。つまり、これらは、電子ズームを行わないときの像中心部のMTFと同じである。

図12及び図13と、図14及び図15とを比較すると、撮像面サイズを $2\text{mm} \times 1.5\text{mm}$ に限定して薄膜409aの形状を最適化した状態の方が、最適化しない場合、即ち撮像面サイズが $4\text{mm} \times 3\text{mm}$ である場合に比べてMTFが向上していることがわかる。

次に、第1実施例の光学系を構成する光学部材の数値データを示す

#### 数値データ1

焦点距離：4.4mm（銀塩換算38mm）

開放Fナンバー：2.8

撮像面のサイズ：4.0mm×3.0mm（X方向×Y方向）

面番号	曲率半径	面間隔	偏心	屈折率	アッペ数
物体面	$\infty$	$\infty$			
1	ASP [1]	0.800	偏心 (1)	1.8141	32.2
2	ASP [2]	4.200	偏心 (1)		

3	$\infty$	0.000	偏心 (2)		
4	FFS [1]	0.000	偏心 (3)		
5	$\infty$	3.800	偏心 (4)		
6 (絞り面)	$\infty$	0.100			
7	ASP [3]	2.000	偏心 (5)	1.7465	51.1
8	ASP [4]	5.438	偏心 (5)		
9	7.324	2.021	偏心 (6)	1.5011	68.3
10	-7.973	0.800	偏心 (6)	1.8307	24.5
11	5.885	0.300	偏心 (6)		
12	5.787	2.000	偏心 (7)	1.4900	70.0
13	ASP [5]	1.626	偏心 (7)		
14	$\infty$	1.000		1.5163	64.1
15	$\infty$	1.290		1.5477	62.8
16	$\infty$	0.800			
17	$\infty$	0.750		1.5163	64.1
18	$\infty$	1.200			
像 面	$\infty$	0.000	偏心 (8)		

非球面係数

ASP[1]

曲率半径 70.428

k= 0

a=  $2.2133 \times 10^{-3}$       b=  $-4.1162 \times 10^{-4}$       c=  $2.4537 \times 10^{-5}$

d=  $-3.6373 \times 10^{-7}$

ASP[2]

曲率半径 3.507

k= 0

a=  $2.1789 \times 10^{-3}$       b=  $-4.6380 \times 10^{-4}$       c=  $-3.9638 \times 10^{-5}$

d=  $5.3918 \times 10^{-6}$

### ASP[3]

曲率半径 13.911

k= 0

a=  $5.4052 \times 10^{-5}$       b=  $-2.3064 \times 10^{-6}$       c=  $1.0798 \times 10^{-6}$

d=  $3.3961 \times 10^{-8}$

### ASP[4]

曲率半径 -9.140

k= 0

a=  $3.7861 \times 10^{-4}$       b=  $6.5188 \times 10^{-6}$       c=  $-8.0902 \times 10^{-8}$

d=  $9.8151 \times 10^{-8}$

### ASP[5]

曲率半径 -8.610

k= 0

a=  $1.3105 \times 10^{-3}$       b=  $-2.6285 \times 10^{-5}$       c=  $2.0896 \times 10^{-6}$

d=  $-9.3284 \times 10^{-8}$

【 0 1 0 6 】

### 偏心率

偏心 [1] (DAR)

X= 0.000      Y= -0.455      Z= 0.000

$\alpha$  = 0.000       $\beta$  = 0.000       $\gamma$  = 0.000

偏心 [2] (DE0)

X= 0.000      Y= 0.000      Z= 0.000

$\alpha$  = 45.000       $\beta$  = 0.000       $\gamma$  = 0.000

偏心 [3] (DAR)

X= 0.000      Y (FFS [1] に記載)      Z (FFS [1] に記載)

$\alpha$  = -0.783       $\beta$  = 0.000       $\gamma$  = 0.000

偏心 [4] (DE0)

X= 0.000      Y= 0.000      Z= 0.000

$\alpha$  = 45.000       $\beta$  = 0.000       $\gamma$  = 0.000

偏心 [5] (DAR)

$$X = 0.000 \quad Y = 0.428 \quad Z = 0.000$$

$$\alpha = 0.000 \quad \beta = 0.000 \quad \gamma = 0.000$$

偏心 [6] (DAR)

$$X = 0.000 \quad Y = 0.270 \quad Z = 0.000$$

$$\alpha = 0.000 \quad \beta = 0.000 \quad \gamma = 0.000$$

偏心 [7] (DAR)

$$X = 0.000 \quad Y = 0.147 \quad Z = 0.000$$

$$\alpha = 0.000 \quad \beta = 0.000 \quad \gamma = 0.000$$

偏心 [8] (DAR)

$$X = 0.000 \quad Y = 0.000 \quad Z = 0.000$$

$$\alpha = -2.000 \quad \beta = 0.000 \quad \gamma = 0.000$$

FFS [1]

狀態 1 : 遠点余裕 ( $\infty$ )

$$C 4 = 0.00000 \quad C 6 = 0.00000 \quad C 8 = 0.00000$$

$$C 10 = 0.00000 \quad C 11 = 0.00000 \quad C 13 = 0.00000$$

$$C 15 = 0.00000$$

$$X = 0 \quad Y = 0 \quad Z = 0$$

狀態 2 : 遠点 ( $\infty$ )

$$C 4 = -0.5892 \times 10^{-3} \quad C 6 = -0.3128 \times 10^{-3} \quad C 8 = -0.3938 \times 10^{-4}$$

$$C 10 = -0.2812 \times 10^{-4} \quad C 11 = 0.2639 \times 10^{-5} \quad C 13 = -0.2463 \times 10^{-5}$$

$$C 15 = -0.2641 \times 10^{-5}$$

$$X = 0 \quad Y = 0.47001 \quad Z = 0.00338$$

狀態 3 : 近点 (150mm)

$$C 4 = -0.1086 \times 10^{-2} \quad C 6 = -0.6189 \times 10^{-3} \quad C 8 = -0.6338 \times 10^{-4}$$

$$C 10 = -0.4815 \times 10^{-4} \quad C 11 = 0.3921 \times 10^{-5} \quad C 13 = 0.6584 \times 10^{-6}$$

$$C 15 = -0.2915 \times 10^{-5}$$

$$X = 0 \quad Y = 0.34044 \quad Z = 0.00643$$

狀態 4 : 近点余裕 (150mm)

$$\begin{aligned} C 4 &= -0.1575 \times 10^{-2} & C 6 &= -0.9311 \times 10^{-3} & C 8 &= -0.9810 \times 10^{-4} \\ C 10 &= -0.7349 \times 10^{-4} & C 11 &= 0.5562 \times 10^{-6} & C 13 &= -0.2496 \times 10^{-5} \\ C 15 &= -0.4413 \times 10^{-5} \end{aligned}$$

$$X = 0 \quad Y = 0.36255 \quad Z = 0.00964$$

状態 5 : 2 倍電子ズームに合わせて可変ミラーを最適化したとき 遠点 ( $\infty$ )

FFS [1]

$$\begin{aligned} C 4 &= -6.3929474 \times 10^{-4} & C 6 &= -3.6980265 \times 10^{-4} \\ C 8 &= -2.8038856 \times 10^{-5} & C 10 &= -1.8430997 \times 10^{-5} \\ C 11 &= 1.1082276 \times 10^{-6} & C 13 &= -3.6490148 \times 10^{-7} \\ C 15 &= -7.0733077 \times 10^{-7} \end{aligned}$$

$$X = 0 \quad Y = 1.6130766 \quad Z = 1.5976326 \times 10^{-2}$$

偏心 [3] (DAR)

X (FFS [1] に記載)      Y (FFS [1] に記載)      Z (FFS [1] に記載)

$$\alpha = -8.4693588 \times 10^{-1} \quad \beta = 0.000 \quad \gamma = 0.000$$

$$m d = 0.003$$

この状態では、m d の値は偏心 Z の値とは異なる。

他の面のデータは状態 1 ~ 4 に共通である。

状態 6 : 2 倍電子ズームに合わせて可変ミラーを最適化したとき 近点 (150 mm)

FFS [1]

$$\begin{aligned} C 4 &= -8.6605429 \times 10^{-4} & C 6 &= -3.3179512 \times 10^{-4} \\ C 8 &= -8.2667455 \times 10^{-5} & C 10 &= -3.1749661 \times 10^{-5} \\ C 11 &= 7.4217471 \times 10^{-6} & C 13 &= -1.6164728 \times 10^{-7} \\ C 15 &= -2.8477659 \times 10^{-6} \end{aligned}$$

$$X = 0 \quad Y = -1.7740545 \quad Z = -9.0076818 \times 10^{-3}$$

偏心 [3] (DAR)

X (FFS [1] に記載)      Y (FFS [1] に記載)      Z (FFS [1] に記載)

$$\alpha = -8.4693588 \times 10^{-1} \quad \beta = 0.000 \quad \gamma = 0.000$$

$$m d = 0.006$$

この状態では、 $m d$  の値は偏心  $Z$  の値とは異なる。

他の面のデータは状態 1 ～ 4 に共通である。

次に、第 1 実施例における条件式のパラメータ値を表 1 に示す。

表 1

	条件式	状態 1	状態 2	状態 3	状態 4
物体距離		$\infty$ 余裕	$\infty$	150mm	150mm 余裕
$\phi DM_x$ (パワー $x$ ) [1/mm]		$0.000 \times 10^0$	$-5.892 \times 10^{-4}$	$-1.086 \times 10^{-3}$	$-1.575 \times 10^{-3}$
$\phi DM_y$ (パワー $y$ ) [1/mm]		$0.000 \times 10^0$	$-3.128 \times 10^{-4}$	$-6.189 \times 10^{-4}$	$-9.311 \times 10^{-4}$
$m d$ (変形量) [mm]		$0.000 \times 10^0$	$3.380 \times 10^{-3}$	$6.430 \times 10^{-3}$	$9.640 \times 10^{-3}$
$\beta_1$ (後群倍率)	条件式 (9)	-0.995	-0.995	-0.994	-0.993
$f$ (焦点距離) [mm]		4.538	4.538	4.538	4.538
$C_j$ (光学系の全長) [mm]		28.250	28.250	28.250	28.250
$S_m$ (ミラー面積) [mm <sup>2</sup> ]		25.525	25.525	25.525	25.525
$f_1$ (前群焦点距離) [mm]		-4.558	-4.558	-4.558	-4.558
$\delta$ (シフト最大値) [mm]		0.455	0.455	0.455	0.455
$\varepsilon$ (ティルト最大値) [deg]	条件式 (12)	-2.000	-2.000	-2.000	-2.000
$ m d / f $	条件式 (3)	$0.000 \times 10^0$	$7.448 \times 10^{-4}$	$1.417 \times 10^{-3}$	$2.124 \times 10^{-3}$
$m d^2 / S_m$	条件式 (4)	$0.000 \times 10^0$	$4.476 \times 10^{-7}$	$1.620 \times 10^{-6}$	$3.641 \times 10^{-6}$
$ \phi D M \times f $	条件式 (6)	$0.000 \times 10^0$	$2.047 \times 10^{-4}$	$3.868 \times 10^{-3}$	$5.686 \times 10^{-3}$
$f_1 / f$	条件式 (7)	-1.004	-1.004	-1.004	-1.004
$C_j / f$	条件式 (10)	6.225	6.225	6.225	6.225
$ \delta / f $	条件式 (11)	0.100	0.100	0.100	0.100



	条件式	状態 5	状態 6
物体距離		$\infty$	150mm
$\phi DM_x$ (パワー x) [1/mm]		$-6.393 \times 10^{-4}$	$-8.661 \times 10^{-4}$
$\phi DM_y$ (パワー y) [1/mm]		$-3.698 \times 10^{-4}$	$-3.318 \times 10^{-4}$
m d (変形量) [mm]		$3 \times 10^{-3}$	$6 \times 10^{-3}$
$\beta_1$ (後群倍率)	条件式 (9)	-0.995	-0.994
f (焦点距離) [mm]		4.538	4.538
C j (光学系の全長) [mm]		28.250	28.250
S m (ミラー面積) [mm <sup>2</sup> ]		25.525	25.525
f <sub>1</sub> (前群焦点距離) [mm]		-4.558	-4.558
$\delta$ (シフト最大値) [mm]		0.455	0.455
$\varepsilon$ (ティルト最大値) [deg]	条件式 (12)	-2.000	-2.000
$ m d / f $	条件式 (3)	$6.6 \times 10^{-4}$	$1.32 \times 10^{-3}$
$m d^2 / S m$	条件式 (4)	$3.52 \times 10^{-7}$	$1.41 \times 10^{-6}$
$ \phi D M \times f $	条件式 (6)	$2.290 \times 10^{-3}$	$2.718 \times 10^{-3}$
$f_1 / f$	条件式 (7)	-1.004	-1.004
C j / f	条件式 (10)	6.225	6.225
$ \delta / f $	条件式 (11)	0.100	0.100

## 第2実施例

図16～図18は本発明の光学装置に適用可能な光学系の第2実施例の概略構成を示すY-Z断面図である。図16は広角端、図17は標準、図18は望遠端での各状態を示している。

第2実施例の形状可変ミラーは、遠点から近点をフォーカシングするためにパワーを変えることができるが、コントラスト方式のオートフォーカスを行うために遠点合焦時よりも弱いパワーの状態、及び近点合焦時よりも強いパワーの状

態を取れるように設計されている。第2実施例では、遠点合焦時よりも弱いパワーの状態を遠点余裕、近点合焦時よりも強いパワーの状態を近点余裕と定義している。つまり、形状可変ミラーは遠点余裕、遠点、近点、近点余裕の4状態それぞれに、変倍の広角端、中間状態、望遠端の3状態が存在するので、全部で12状態が存在することになる。

なお、第2実施例における形状可変ミラーは、実際の製作時の製造誤差による像面のZ方向のずれ、及び温度変化による像面のZ方向のずれを考慮して、フォーカス範囲の前後に変形量の余裕を持たせた設計になっている。

第2実施例の光学系は、物体側から順に、負のパワーを有する固定レンズ群G1'と、形状可変ミラーDMと、正のパワーを有する固定レンズ群G15'と、正のパワーを有する移動レンズ群G2'と、絞りSと、負のパワーを有する固定レンズ群G3'と、正のパワーを有する移動レンズ群G4'と、正のパワーを有する固定レンズ群G5'とを有している。図16～図18中、符号FLはフィルター群である。

固定レンズ群G1'は、両凹負レンズで構成されている。固定レンズ群G15'は、物体側に凸面を向けた正メニスカスレンズで構成されている。移動レンズ群G2'は、物体側に凸面を向けた負メニスカスレンズと両凸正レンズとの接合レンズで構成されている。固定レンズ群G3'は、両凹負レンズと物体側に凸面を向けた正メニスカスレンズとの接合レンズで構成されている。移動レンズ群G4'は、両凸正レンズと、両凸正レンズと両凹負レンズとの接合レンズとで構成されている。固定レンズ群G5'は、両凸正レンズで構成されている。

また、第2実施例の光学系は、移動レンズ群G2'と移動レンズ群G4'とが移動することで、変倍作用を持たせている。また、形状可変ミラーDMの反射面を形成する薄膜が変形することで、無限遠から近点300mmまでフォーカシングを行うことができるようになっている。

形状可変ミラーの薄膜が平面から曲面に変形すると、ミラー面の反射によって偏心収差が発生し、特に形状可変ミラーDMの変形量が大きい至近合焦時に偏心収差は増大して発生する。このため、第2実施例の光学系においても、遠点から近点まで良好な光学性能を得るために、レンズ群あるいは撮像面にシフト及びティ

ルトの偏心を加えて、フォーカシング時の偏心収差の発生をバランスさせている。

第1実施例及び第2実施例の光学系によれば、メカ的な駆動を行わずにフォーカシングできるので、鏡枠構造が簡単になり、小型化、低コスト化を実現することができる。さらに、フォーカシング時のモーターの駆動音がなくなるメリットがある。

なお、第1実施例において、光学系の中に可変ミラーを配置することにより、各種の作用効果を奏し得たが、第2実施例においても同様の作用効果を奏し得る。

次に、第2実施例の光学系を構成する光学部材の数値データを示す。

## 数値データ2

焦点距離：4.4mm（広角）～13.2mm（望遠），7.6mm（標準）

開放Fナンバー：2.4～5.3

撮像面のサイズ：4.0mm×3.0mm（X方向×Y方向）

動くレンズ間隔は（広角）－（標準）－（望遠）の順である。

面番号	曲率半径	面間隔	偏心	屈折率	アッペ数
物体面	$\infty$	$\infty$			
1（仮想面）	$\infty$	0.00			
2	-50.75	1.00	偏心(1)	1.7800	50.0
3	ASP[1]	0.00			
4（仮想面）	$\infty$	6.60			
5（仮想面）	$\infty$	0.00			
6（仮想面）	$\infty$	0.00			
7（仮想面）	$\infty$	0.00	偏心(2)		
8	FFS[1]	0.00	偏心(3)		
9（仮想面）	$\infty$	0.00	偏心(2)		
10（仮想面）	$\infty$	4.64			
11	19.94	1.27	偏心(4)	1.8500	24.0
12	29.66	0.10	偏心(4)		
13（仮想面）	$\infty$	8.44～1.70～0.00			
14	21.47	1.00	偏心(5)	1.8500	24.0

15	10.21	1.86	偏心(5)	1.6173	57.3
16	ASP[2]	1.70~8.44~10.14	偏心(5)		
17 (絞り面)		1.00	偏心(6)	1.7281	48.3
18	11.26	1.33	偏心(6)	1.8500	24.0
19	77.41	0.10	偏心(6)		
20 (仮想面)	$\infty$	8.45~6.07~0.10			
21	ASP[3]	3.56	偏心(7)	1.4900	70.0
22	ASP[4]	0.75	偏心(7)		
23	9.80	2.77	偏心(8)	1.5269	65.1
24	-7.45	3.89	偏心(8)	1.7727	31.5
25	4.26	3.27~5.65~11.62	偏心(8)		
26 (仮想面)	$\infty$	0.00			
27	7.43	2.13	偏心(9)	1.4900	70.0
28	-14.27	0.30	偏心(9)		
29	$\infty$	1.44		1.5477	62.8
30	$\infty$	0.10			
31	$\infty$	0.60		1.5163	64.1
32	$\infty$	0.50			
33 (仮想面)	$\infty$	0.00			
像 面	$\infty$	0.00	偏心(10)		

非球面係数

ASP[1]

曲率半径 7.18

k= 0

a=  $-3.8858 \times 10^{-4}$       b=  $-3.6372 \times 10^{-6}$       c=  $-8.8491 \times 10^{-8}$

d=  $3.2705 \times 10^{-10}$

ASP[2]

曲率半径 -16.03

k= 0

$$a = 4.4224 \times 10^{-5} \quad b = 5.4185 \times 10^{-9} \quad c = 1.6428 \times 10^{-8}$$

$$d = -7.0199 \times 10^{-10}$$

ASP[3]

曲率半径        7.70

$$k = 0$$

$$a = -1.6991 \times 10^{-4} \quad b = -1.7112 \times 10^{-7} \quad c = 3.8286 \times 10^{-8}$$

$$d = -7.0832 \times 10^{-9}$$

ASP[4]

曲率半径        -12.01

$$k = 0$$

$$a = 2.8459 \times 10^{-4} \quad b = 1.9921 \times 10^{-6} \quad c = -1.3381 \times 10^{-7}$$

$$d = -3.1611 \times 10^{-9}$$

偏心率

偏心[1] (DEO)

$$X = 0.00 \quad Y = 0.06 \quad Z = 0.00$$

$$\alpha = -0.76 \quad \beta = 0.00 \quad \gamma = 0.00$$

偏心[2] (DAR)

$$X = 0.00 \quad Y = 0.00 \quad Z = 0.00$$

$$\alpha = 45.00 \quad \beta = 0.00 \quad \gamma = 0.00$$

偏心[3] (DAR)

$$X = 0.00 \quad Y \text{ (FFS[1]に記載)} \quad Z \text{ (FFS[1]に記載)}$$

$$\alpha = -0.29 \quad \beta = 0.00 \quad \gamma = 0.00$$

偏心[4] (DAR)

$$X = 0.00 \quad Y = 0.00 \quad Z = 0.00$$

$$\alpha = 0.00 \quad \beta = 0.00 \quad \gamma = 0.00$$

偏心[5] (DAR)

$$X = 0.00 \quad Y = -0.05 \quad Z = 0.00$$

$$\alpha = 0.00 \quad \beta = 0.00 \quad \gamma = 0.00$$

偏心[6] (DAR)

$$X = 0.00 \quad Y = 0.07 \quad Z = 0.00$$

$$\alpha = 0.00 \quad \beta = 0.00 \quad \gamma = 0.00$$

偏心[7] (DAR)

$$X = 0.00 \quad Y = -0.01 \quad Z = 0.00$$

$$\alpha = 0.00 \quad \beta = 0.00 \quad \gamma = 0.00$$

偏心[8] (DAR)

$$X = 0.00 \quad Y = 0.00 \quad Z = 0.00$$

$$\alpha = 0.00 \quad \beta = 0.00 \quad \gamma = 0.00$$

偏心[9] (DAR)

$$X = 0.00 \quad Y = 0.19 \quad Z = 0.00$$

$$\alpha = 0.00 \quad \beta = 0.00 \quad \gamma = 0.00$$

偏心[10] (DAR)

$$X = 0.00 \quad Y = 0.00 \quad Z = 0.00$$

$$\alpha = 1.15 \quad \beta = 0.00 \quad \gamma = 0.00$$

ただし、第4面の座標系は第1面の座標系と同じである。また、第5面以後の座標系は第4面から順に定義していくものとする。

FFS [1]

状態1：広角 遠点余裕 ( $\infty$ )

状態2：標準 遠点余裕 ( $\infty$ )

状態3：望遠 遠点余裕 ( $\infty$ )

以上3状態ではC4～C21はすべて0

偏心 Y、Z もすべて0である。

状態4：広角 遠点 ( $\infty$ )

$$C4 = -5.8995 \times 10^{-4} \quad C6 = -2.9424 \times 10^{-4} \quad C8 = -1.1899 \times 10^{-5}$$

$$C10 = -5.2364 \times 10^{-6} \quad C11 = 6.5392 \times 10^{-6} \quad C13 = 5.6143 \times 10^{-6}$$

$$C15 = 1.5847 \times 10^{-6} \quad C17 = 5.4357 \times 10^{-7} \quad C19 = -1.9838 \times 10^{-8}$$

$$C21 = 1.4414 \times 10^{-7}$$

$$X = 0 \quad Y = 2.5683618 \times 10^{-2} \quad Z = 7.5651900 \times 10^{-3}$$

状態5：標準 遠点

$$\begin{aligned}
C\ 4 &= -2.2653 \times 10^{-4} & C\ 6 &= -1.1179 \times 10^{-4} & C\ 8 &= -7.6259 \times 10^{-6} \\
C\ 10 &= -2.9580 \times 10^{-6} & C\ 11 &= 2.5261 \times 10^{-6} & C\ 13 &= 1.9724 \times 10^{-6} \\
C\ 15 &= 6.5262 \times 10^{-7} & C\ 17 &= 2.5658 \times 10^{-7} & C\ 19 &= -7.4094 \times 10^{-8} \\
C\ 21 &= 5.0196 \times 10^{-8}
\end{aligned}$$

$$X = 0 \quad Y = 6.7269098 \times 10^{-2} \quad Z = 2.7958048 \times 10^{-3}$$

狀態 6：望遠 遠点 ( $\infty$ )

$$\begin{aligned}
C\ 4 &= -1.0629 \times 10^{-4} & C\ 6 &= -5.1178 \times 10^{-5} & C\ 8 &= -3.0545 \times 10^{-6} \\
C\ 10 &= -1.3201 \times 10^{-6} & C\ 11 &= 1.7419 \times 10^{-6} & C\ 13 &= 1.5053 \times 10^{-6} \\
C\ 15 &= 3.9446 \times 10^{-7} & C\ 17 &= 1.1609 \times 10^{-7} & C\ 19 &= -7.8183 \times 10^{-8} \\
C\ 21 &= 2.1350 \times 10^{-8}
\end{aligned}$$

$$X = 0 \quad Y = -2.8997388 \times 10^{-1} \quad Z = 1.1937900 \times 10^{-3}$$

狀態 7：広角 近点 (300mm)

$$\begin{aligned}
C\ 4 &= -8.9987 \times 10^{-4} & C\ 6 &= -4.6031 \times 10^{-4} & C\ 8 &= -1.2709 \times 10^{-5} \\
C\ 10 &= -9.2227 \times 10^{-6} & C\ 11 &= 5.8328 \times 10^{-6} & C\ 13 &= 5.2240 \times 10^{-6} \\
C\ 15 &= 1.3529 \times 10^{-6} & C\ 17 &= -1.3885 \times 10^{-7} & C\ 19 &= 2.9544 \times 10^{-7} \\
C\ 21 &= 1.2636 \times 10^{-7}
\end{aligned}$$

$$X = 0 \quad Y = 1.8131829 \times 10^{-1} \quad Z = 1.2704720 \times 10^{-2}$$

狀態 8：標準 近点 (300mm)

$$\begin{aligned}
C\ 4 &= -5.5202 \times 10^{-4} & C\ 6 &= -2.8215 \times 10^{-4} & C\ 8 &= -1.5110 \times 10^{-5} \\
C\ 10 &= -8.0880 \times 10^{-6} & C\ 11 &= 1.0816 \times 10^{-6} & C\ 13 &= 8.5525 \times 10^{-7} \\
C\ 15 &= -2.4178 \times 10^{-7} & C\ 17 &= -2.6235 \times 10^{-7} & C\ 19 &= -1.2175 \times 10^{-8} \\
C\ 21 &= -6.1369 \times 10^{-8}
\end{aligned}$$

$$X = 0 \quad Y = 4.6081175 \times 10^{-1} \quad Z = 8.3554983 \times 10^{-3}$$

狀態 9：望遠 近点 (300mm)

$$\begin{aligned}
C\ 4 &= -4.4543 \times 10^{-4} & C\ 6 &= -2.3298 \times 10^{-4} & C\ 8 &= -1.5323 \times 10^{-5} \\
C\ 10 &= -9.3389 \times 10^{-6} & C\ 11 &= 6.7912 \times 10^{-7} & C\ 13 &= 3.7985 \times 10^{-7} \\
C\ 15 &= 5.8882 \times 10^{-8} & C\ 17 &= -1.2604 \times 10^{-7} & C\ 19 &= 9.7671 \times 10^{-8} \\
C\ 21 &= 4.6322 \times 10^{-8}
\end{aligned}$$

$$X = 0 \quad Y = 4.5036089 \times 10^{-1} \quad Z = 6.7530421 \times 10^{-3}$$

状態 1 0 : 広角 近点余裕 (300mm)

$$\begin{aligned}C 4 &= -1.4304 \times 10^{-3} & C 6 &= -7.4243 \times 10^{-4} & C 8 &= -3.0911 \times 10^{-5} \\C 10 &= -2.5613 \times 10^{-5} & C 11 &= 7.5650 \times 10^{-6} & C 13 &= 5.8627 \times 10^{-6} \\C 15 &= 2.0048 \times 10^{-6} & C 17 &= -2.3602 \times 10^{-7} & C 19 &= 1.0980 \times 10^{-6} \\C 21 &= 4.6601 \times 10^{-7} \\X &= 0 & Y &= 2.6318036 \times 10^{-1} & Z &= 2.0749379 \times 10^{-2}\end{aligned}$$

状態 1 1 : 標準 近点余裕 (300mm)

$$\begin{aligned}C 4 &= -7.6639 \times 10^{-4} & C 6 &= -3.9897 \times 10^{-4} & C 8 &= -2.6746 \times 10^{-5} \\C 10 &= -1.4551 \times 10^{-5} & C 11 &= 2.3683 \times 10^{-6} & C 13 &= 2.2765 \times 10^{-6} \\C 15 &= 2.1997 \times 10^{-7} & C 17 &= 1.3439 \times 10^{-7} & C 19 &= 4.1759 \times 10^{-7} \\C 21 &= 5.7639 \times 10^{-8} \\X &= 0 & Y &= 4.6261205 \times 10^{-1} & Z &= 1.1455965 \times 10^{-2}\end{aligned}$$

状態 1 2 : 望遠 近点余裕 (300mm)

$$\begin{aligned}C 4 &= -5.4800 \times 10^{-4} & C 6 &= -2.8654 \times 10^{-4} & C 8 &= -2.1514 \times 10^{-5} \\C 10 &= -1.1640 \times 10^{-5} & C 11 &= 1.1846 \times 10^{-6} & C 13 &= 1.8790 \times 10^{-7} \\C 15 &= 1.4185 \times 10^{-7} & C 17 &= 1.0460 \times 10^{-7} & C 19 &= 1.0214 \times 10^{-7} \\C 21 &= 7.2358 \times 10^{-8} \\X &= 0 & Y &= 4.5428613 \times 10^{-1} & Z &= 8.2647224 \times 10^{-3}\end{aligned}$$

図 1 9 は図 1 6 ～図 1 8 に示した第 2 実施例の光学系において、2 倍電子ズームを行ったときの波動光学的 M T F ( 1 4 0 mm / 本 ) を示すグラフである。光学系は望遠状態、物点距離  $\infty$  である。図 1 9 の上部に示した物体位置 5 箇所について M T F のグラフを重ね書きしてある。

図 2 0 は図 1 6 ～図 1 8 に示した第 2 実施例の光学系において、可変ミラーの形状を電子ズームを行うときに利用する画像の部分だけに対して最適化したときの M T F を示すグラフである。M T F の計算条件は図 1 9 と同じである。図 1 9 に比べて図 2 0 の M T F が向上していることがわかる。

次に、第 2 実施例の光学系を構成する光学部材における図 2 0 に示した状態のときの数値データを示す。なお、ここでは第 8 面のデータのみ示してある。他の面の数値データは上記第 2 実施例における数値データの第 6 状態と同じ



である。

状態 1 3 電子ズームに合わせて可変ミラーを最適化した時

FFS[1]

$$\begin{aligned} C 4 &= -2.7203 \times 10^{-4} & C 6 &= -1.3596 \times 10^{-4} & C 8 &= -4.0935 \times 10^{-6} \\ C 10 &= -1.9999 \times 10^{-6} & C 11 &= 1.5109 \times 10^{-6} & C 13 &= 1.6613 \times 10^{-6} \\ C 15 &= 4.9016 \times 10^{-7} & C 17 &= 1.2327 \times 10^{-7} & C 19 &= 1.3220 \times 10^{-7} \\ C 21 &= 3.9806 \times 10^{-8} \end{aligned}$$

偏心[3]

$$\begin{aligned} X &= 0.00 & Y &= 2.6902975 \times 10^{-2} & Z &= 3.7656323 \times 10^{-3} \\ \alpha &= -2.5095701 \times 10^{-1} & \beta &= 0.00 & \gamma &= 0.00 \end{aligned}$$

なお、条件式(1), (1'), (2), (3), (3'), (3''), (4), (4'), (5), (5'), (6), (6'), (6''), (7), (7'), (8), (8'), (9), (9'), (10), (10'), (10''), (11), (11'), (11''), (12), (12')及び(12'')は、図 1 6 ~ 図 1 8 に示した第 2 実施例の光学系においても第 1 実施例の光学系と同様にあてはまる。これらの条件式は、少なくとも一つのズーム状態において満たされていればよい。

第 2 実施例において、条件式(3), (3')及び(3'')の焦点距離  $f$  の値は、数値データに記載の通り、4.4 mm (広角) ~ 13.2 mm (望遠) 及び 7.6 mm (標準) である。可変ミラーの最大変形量  $m d$  の値 (mm) は、第 8 面の偏心量  $Z$  の値に等しい。条件式(4), (4'')の形状可変ミラーにおける光学的に有効な反射面の面積  $S m$  の値は、69.08 mm<sup>2</sup> である。条件式(5), (5')の形状可変ミラーに印加する電圧  $V m$  の値は、状態によって変化するが、0 ~ 200 V である。条件式(6), (6'), (6'')の形状可変ミラーのパワー  $\Phi D M$  の値は、 $\Phi D M = 1 / 2 (C 4 + C 6)$  である。また、 $\phi D M x = C 4$ ,  $\phi D M y = C 6$  である。条件式(7), (7')の可変ミラーの物体側に配置された負パワーのレンズ群の焦点距離  $f 1$  の値は、-8.003 である。条件式(8), (8')の可変ミラーにおける軸上主光線の折り曲げ角  $\theta$  の値は、90.6° である。条件式(9), (9')の可変ミラーの直後の光学面から最終面までのレンズ群の倍率  $\beta 1$  は、広角-0.550、標準-0.950、望遠-1.649 である。条件式(10), (10'), (10'')の光学系の全長  $C j$  は、56.78 mm である。上述の

ように、本発明の各条件式は、光学系の少なくとも一つの状態で満たされていればよい。

次に、第2実施例における条件式(3)、(4)、(6)、(7)、(9)及び(10)のパラメータ値を表2～表6に、条件式(11)及び(12)のパラメータ値を表7～表10にそれぞれ示す。

表 2

	条件式	状態 1	状態 2	状態 3
物体距離		広角 $\infty$ 余裕	標準 $\infty$ 余裕	望遠 $\infty$ 余裕
$\phi DM_x$ (パワーx) [1/mm]		0.000 $\times 10^0$	0.000 $\times 10^0$	0.000 $\times 10^0$
$\phi DM_y$ (パワーy) [1/mm]		0.000 $\times 10^0$	0.000 $\times 10^0$	0.000 $\times 10^0$
$\phi DM$		0.000 $\times 10^0$	0.000 $\times 10^0$	0.000 $\times 10^0$
md (変形量) [mm]		0	0	0
$\beta l$ (後群倍率)	条件式(9)	-0.550	-0.950	-1.649
f (焦点距離) [mm]		4.4	7.6	13.2
Cj (光学系の全長) [mm]		56.78	56.78	56.78
Sm (ミラー面積) [mm <sup>2</sup> ]		69.08	69.08	69.08
f1 (前群焦点距離) [mm]		-8.003	-8.003	-8.003
$ md/f $	条件式(3)	0.000 $\times 10^0$	0.000 $\times 10^0$	0.000 $\times 10^0$
$md^2/Sm$	条件式(4)	0	0	0
$ \phi DM \times f $	条件式(6)	0.000 $\times 10^0$	0.000 $\times 10^0$	0.000 $\times 10^0$
f1/f	条件式(7)	-1.819	-1.053	-0.606
Cj/f	条件式(10)	12.905	7.471	4.302

表 3

	条件式	状態 4	状態 5	状態 6
物体距離		広角 $\infty$	標準 $\infty$	望遠 $\infty$
$\phi DM_x$ (パワーx) [1/mm]		$-5.8995 \times 10^{-4}$	$-2.2653 \times 10^{-4}$	$-1.0629 \times 10^{-4}$
$\phi DM_y$ (パワーy) [1/mm]		$-2.9424 \times 10^{-4}$	$-1.1179 \times 10^{-4}$	$-5.1178 \times 10^{-5}$
$\phi DM$		$-4.4210 \times 10^{-4}$	$-1.6916 \times 10^{-4}$	$-7.8734 \times 10^{-5}$
m d (変形量) [mm]		0.00757	0.0028	0.00119
$\beta 1$ (後群倍率)	条件式 (9)	-0.550	-0.950	-1.649
f (焦点距離) [mm]		4.4	7.6	13.2
C j (光学系の全長) [mm]		56.78	56.78	56.78
S m (ミラー面積) [mm <sup>2</sup> ]		69.08	69.08	69.08
f 1 (前群焦点距離) [mm]		-8.003	-8.003	-8.003
m d / f	条件式 (3)	$1.7205 \times 10^{-3}$	$3.6842 \times 10^{-4}$	$9.0152 \times 10^{-5}$
m d <sup>2</sup> / S m	条件式 (4)	$8.29544 \times 10^{-7}$	$1.13492 \times 10^{-7}$	$2.04994 \times 10^{-8}$
$\phi DM \times f$	条件式 (6)	$-1.9452 \times 10^{-3}$	$-1.2856 \times 10^{-3}$	$-1.0393 \times 10^{-3}$
f 1 / f	条件式 (7)	-1.819	-1.053	-0.606
C j / f	条件式 (10)	12.905	7.471	4.302

表 4

	条件式	状態 7	状態 8	状態 9
物体距離		広角 300mm	標準 300mm	望遠 300mm
$\phi DM_x$ (パワーx) [1/mm]		$-8.9987 \times 10^{-4}$	$-5.5202 \times 10^{-4}$	$-4.4543 \times 10^{-4}$
$\phi DM_y$ (パワーy) [1/mm]		$-4.6031 \times 10^{-4}$	$-2.8215 \times 10^{-4}$	$-2.3298 \times 10^{-4}$
$\phi DM$		$-6.8009 \times 10^{-4}$	$-4.1709 \times 10^{-4}$	$-3.3921 \times 10^{-4}$
m d (変形量) [mm]		0.0127	0.00836	0.00675

$\beta_1$ (後群倍率)	条件式 (9)	-0.550	-0.950	-1.649
f (焦点距離) [mm]		4.4	7.6	13.2
Cj (光学系の全長) [mm]		56.78	56.78	56.78
Sm (ミラー面積) [mm <sup>2</sup> ]		69.08	69.08	69.08
f <sub>1</sub> (前群焦点距離) [mm]		-8.003	-8.003	-8.003
md / f	条件式 (3)	2.8864 $\times 10^{-3}$	1.1000 $\times 10^{-3}$	5.1136 $\times 10^{-4}$
md <sup>2</sup> / Sm	条件式 (4)	2.33483 $\times 10^{-6}$	1.01172 $\times 10^{-8}$	6.59561 $\times 10^{-7}$
$\phi_{DM} \times f$	条件式 (6)	-2.9924 $\times 10^{-3}$	-3.1698 $\times 10^{-3}$	-4.4775 $\times 10^{-3}$
f <sub>1</sub> / f	条件式 (7)	-1.819	-1.053	-0.606
Cj / f	条件式 (10)	12.905	7.471	4.302

表 5

	条件式	状態 1 0	状態 1 1	状態 1 2
物体距離		広角 300mm 余裕	標準 300mm 余裕	望遠 300mm 余裕
$\phi_{DMx}$ (パワーx) [1/mm]		-1.4304 $\times 10^{-3}$	-7.6639 $\times 10^{-4}$	-5.4800 $\times 10^{-4}$
$\phi_{DMy}$ (パワーy) [1/mm]		-7.4243 $\times 10^{-4}$	-3.9897 $\times 10^{-4}$	-2.8654 $\times 10^{-4}$
$\phi_{DM}$		-1.0864 $\times 10^{-3}$	-5.8268 $\times 10^{-4}$	-4.1727 $\times 10^{-4}$
md (変形量) [mm]		0.02075	0.01146	0.00826
$\beta_1$ (後群倍率)	条件式 (9)	-0.550	-0.950	-1.649
f (焦点距離) [mm]		4.4	7.6	13.2
Cj (光学系の全長) [mm]		56.78	56.78	56.78
Sm (ミラー面積) [mm <sup>2</sup> ]		69.08	69.08	69.08
f <sub>1</sub> (前群焦点距離) [mm]		-8.003	-8.003	-8.003
md / f	条件式 (3)	4.7159 $\times 10^{-3}$	1.5079 $\times 10^{-3}$	6.2576 $\times 10^{-4}$
md <sup>2</sup> / Sm	条件式 (4)	6.23281 $\times 10^{-8}$	1.90115 $\times 10^{-6}$	9.87661 $\times 10^{-7}$

$ \phi DM \times f $	条件式 (6)	$-4.7802 \times 10^{-3}$	$-4.4284 \times 10^{-3}$	$-5.5080 \times 10^{-3}$
$f_1 / f$	条件式 (7)	-1.819	-1.053	-0.606
$C_j / f$	条件式 (10)	12.905	7.471	4.302

表 6

	条件式	状態 1 3
物体距離		望遠 電子 ズーム
$\phi DM_x$ (パワーx) [1/mm]		$-2.7203 \times 10^{-4}$
$\phi DM_y$ (パワーy) [1/mm]		$-1.3596 \times 10^{-4}$
$\phi DM$		$-2.0400 \times 10^{-4}$
$m d$ (変形量) [mm]		0.00377
$\beta_1$ (後群倍率)	条件式 (9)	-1.649
$f$ (焦点距離) [mm]		13.2
$C_j$ (光学系の全長) [mm]		56.78
$S_m$ (ミラー面積) [mm <sup>2</sup> ]		69.08
$f_1$ (前群焦点距離) [mm]		-8.003
$ m d / f $	条件式 (3)	$2.8561 \times 10^{-4}$
$m d^2 / S_m$	条件式 (4)	$2.05746 \times 10^{-7}$
$ \phi DM \times f $	条件式 (6)	$-2.6927 \times 10^{-3}$
$f_1 / f$	条件式 (7)	-0.606
$C_j / f$	条件式 (10)	4.302

表 7

レンズ番号 (物体側から順に数える)	1	2	3
$\delta$ [mm]	0.06	0	-0.05

$ \delta / f $	広角	0.013636364	0	0.011363636
	標準	0.007894737	0	0.006578947
	望遠	0.004545455	0	0.003787879
$\varepsilon$ [deg]		-0.76	0	0
$ \varepsilon / f $	広角	0.172727273	0	0
	標準	0.1	0	0
	望遠	0.057575758	0	0

表 8

レンズ番号 (物体側から順に数える)		4	5	6
$\delta$ [mm]		-0.05	0.07	0.07
$ \delta / f $	広角	0.011363636	0.015909091	0.015909091
	標準	0.006578947	0.009210526	0.009210526
	望遠	0.003787879	0.005303030	0.005303030
$\varepsilon$ [deg]		0	0	0
$ \varepsilon / f $	広角	0	0	0
	標準	0	0	0
	望遠	0	0	0

表 9

レンズ番号 (物体側から順に数える)		7	8	9
$\delta$ [mm]		-0.01	0	0
$ \delta / f $	広角	0.002272727	0	0
	標準	0.001315789	0	0
	望遠	0.000757576	0	0
$\varepsilon$ [deg]		0	0	0
$ \varepsilon / f $	広角	0	0	0
	標準	0	0	0
	望遠	0	0	0

表 10

レンズ番号 (物体側から順に数える)	10	撮像面
-----------------------	----	-----

$\delta$ [mm]		0.19	0
$ \delta / f $	広角	0.043181818	0
	標準	0.025	0
	望遠	0.014393939	0
$\varepsilon$ [deg]		0	1.15
$ \varepsilon / f $	広角	0	0.261363636
	標準	0	0.151315789
	望遠	0	0.087121212

以上の第1実施例及び第2実施例では、形状可変ミラーを用いた光学系について述べた。しかしながら、形状可変ミラーの代わりに形状が変わらない平面ミラーあるいは曲面ミラーを用いた光学系の場合でも、特に支障をきたさない限り前述の条件式及び制限等を適用してよい。なぜならば、ミラーを用いた屈曲光学系における小型化のメリットはそのまま保たれるからである。

また、第1実施例及び第2実施例における光学系では、レンズ群中に反射面を有する構成の光学系について説明したが、反射面を有しない光学系についても光学特性可変光学素子、例えば、可変焦点レンズ等を用いて構成すれば、小型化、低コスト化、省電力化、作動音の静音化等の効果を得ることが可能である。さらに、可変形状面を有しない可変焦点ミラーを以上の実施例に用いても良い。なお、可変焦点ミラーは可変ミラーの一種である。可変焦点ミラーについては、その一例を図46を用いて後述する。

上記光学系は、フィルムカメラ、デジタルカメラ、テレビカメラ、携帯端末用のカメラ、携帯電話の撮像装置、監視カメラ、ロボットの眼、電子内視鏡等に適用可能である。

なお、以上の説明では、光学系として撮像光学系を想定しているが、物体面と像面を入れ替えた構成とすることにより、プロジェクター等の投影光学系として使用することができ、この投影光学系を用いた光学装置を作製することができる。

次に、本発明の光学装置に用いる光学系に適用可能な形状可変ミラー、可変焦点レンズ等、光学特性可変光学素子の構成例について説明する。

図21は本発明の光学装置に用いる光学系に適用可能な光学特性可変光学

素子として形状可変ミラーの一構成例を示す概略図である。図 2 1 の構成例では、形状可変ミラー 4 0 9 は、変形する基板 4 0 9 j の上に形成されたアルミコーティング等で作られた薄膜（反射面）4 0 9 a と、基板 4 0 9 j の下側に設けられた電極 4 0 9 k との 3 層構造の周辺部が輪帯状の支持台 4 2 3 に支持されるとともに、電極 4 0 9 k とは間隔を設けて支持台 4 2 3 に取付けられた複数の電極 4 0 9 b と、各電極 4 0 9 b にそれぞれ接続されて駆動回路として機能する複数の可変抵抗器 4 1 1 a と、可変抵抗器 4 1 1 b と電源スイッチ 4 1 3 を介して電極 4 0 9 k と電極 4 0 9 b 間に接続された電源 4 1 2 と、複数の可変抵抗器 4 1 1 a の抵抗値を制御するための演算装置 4 1 4 とで構成されており、演算装置 4 1 4 には、さらに温度センサー 4 1 5、湿度センサー 4 1 6 及び距離センサー 4 1 7 が接続されて、これらは図示のように 1 つの光学装置を構成している。なお、変形する基板 4 0 9 j は、薄膜でもよいし、板状でもよい。

可変ミラーの反射面は、演算装置 4 1 4 による制御により、平面でなくてもよく、球面、回転対称非球面の他、光軸に対して偏心した球面、平面、回転対称非球面、あるいは、対称面を有する非球面、対称面を 1 つだけ有する非球面、対称面のない非球面、自由曲面、微分不可能な点又は線を有する面等、いかなる形状にも制御される。以下、これらの面を総称して拡張曲面という。薄膜 4 0 9 a で形成される反射面により光線は矢印のように反射される。

前記薄膜 4 0 9 a は、例えば、P.Rai-choudhury 編、Handbook of Microlithography, Micromachining and Microfabrication, Volume 2: Micromachining and Microfabrication, P495, Fig.8.58, SPIE PRESS 刊や Optics Communication, 140 巻（1997 年）P187～190 に記載されているメンブレインミラーのように、複数の電極 4 0 9 b と電極 4 0 9 k の間に電圧が印加されると、静電気力により薄膜 4 0 9 a が変形してその面形状が変化するようにになっている。なお、電極 4 0 9 b の形は、例えば図 2 3 及び図 2 4 に示すように、薄膜 4 0 9 a の変形のさせ方に応じて、同心分割、矩形分割にして、選べばよい。

上記のように、反射面としての薄膜 4 0 9 a の形状は、結像性能が最適になるように演算装置 4 1 4 からの信号により各可変抵抗器 4 1 1 a の抵抗値を変化させることにより制御される。すなわち、演算装置 4 1 4 へ、温度センサー 4 1 5、



湿度センサー 4 1 6 及び距離センサー 4 1 7 から周囲温度及び湿度並びに物体までの距離に応じた大きさの信号が入力され、演算装置 4 1 4 は、これらの入力信号に基づき周囲の温度及び湿度条件と物体までの距離および電子ズームのための画像処理装置 3 0 3 からの指令に基づき、薄膜 4 0 9 a の形状が決定されるような電圧を電極 4 0 9 b に印加するように、各変抵抗器 4 1 1 a の抵抗値を決定するための信号を出力する。このように、薄膜 4 0 9 a は電極 4 0 9 b に印加される電圧すなわち静電気力で変形させられ、その形状は状況により非球面を含む様々な拡張曲面の形状をとる。なお、距離センサー 4 1 7 はなくてもよく、その場合、固体撮像素子 4 0 8 からの像の信号の高周波成分が略最大になるように物体距離を算出し、可変ミラーを変形させるようにすればよい。可変ミラー 4 0 9 はリソグラフィーを用いて作ると加工精度がよく、良い品質のものが得られやすく、良い。

また、変形する基板 4 0 9 j をポリイミドあるいは商品名サイトップ（旭硝子（株）製）等の合成樹脂で製作すれば、低電圧でも大きな変形が可能であるので好都合である。

図 2 1 の構成例では変形する基板 4 0 9 j をはさんで反射面としての薄膜 4 0 9 a と変形する電極 4 0 9 k を別に設けて一体化しているので、製造法がいくつか選べるメリットがある。また反射面としての薄膜 4 0 9 a を導電性の薄膜としてもよい。このようにすると、変形する電極 4 0 9 k を兼ねることができ、両者が 1 つになるので、構造が簡単になるメリットがある。

可変ミラーの反射面の形状は自由曲面にするのが良い。なぜなら収差補正が容易にでき、有利だからである。

また、図 2 1 の構成例では、演算装置 4 1 4、温度センサー 4 1 5、湿度センサー 4 1 6、距離センサー 4 1 7 を設け、温湿度変化、物体距離の変化等も可変ミラー 4 0 9 で補償するようにしたが、そうではなくてもよい。つまり、演算装置 4 1 4、温度センサー 4 1 5、湿度センサー 4 1 6、距離センサー 4 1 7 を省き、観察者の視度変化のみを可変ミラー 4 0 9 で補正するようにしてもよい。

図 2 2 は可変ミラー 4 0 9 の他の構成例を示す概略図である。本構成例の可変ミラーは、反射面としての薄膜 4 0 9 a と電極 4 0 9 b との間に圧電素子 4 0 9

cが介装されていて、これらが支持台423上に設けられている。そして、圧電素子409cに加わる電圧を各電極409b毎に変えることにより、圧電素子409cに部分的に異なる伸縮を生じさせて、薄膜409aの形状を変えることができるようになっている。電極409bの形は、図23に示すように、同心分割であってもよいし、図24に示すように、矩形分割であってもよく、その他、適宜の形のものを選択することができる。図22中、424は演算装置414に接続された振れ（ブレ）センサーであって、例えばこの構成例の光学装置をデジタルカメラに用いる場合には、デジタルカメラの振れを検知し、振れによる像の乱れを補償するように薄膜409aを変形させるべく、演算装置414及び可変抵抗器を内蔵した駆動回路411を介して電極409bに印加される電圧を変化させる。このとき、温度センサー415、湿度センサー416及び距離センサー417からの信号も同時に考慮され、ピント合わせ、温湿度補償等が行われる。この場合、薄膜409aには圧電素子409cの変形に伴う応力が加わるので、薄膜409aの厚さはある程度厚めに作られて相応の強度を持たせるようにするのがよい。

駆動回路411は、電極409bの数に対応して複数配置する構成に限らず、図1に示した駆動回路304のように、1つの駆動回路でもって複数の電極409bを制御する構成にしてもよい。

図25は可変ミラー409のさらに他の構成例を示す概略構成図である。本構成例の可変ミラーは、薄膜409aと電極409bの間に介置される圧電素子が逆方向の圧電特性を持つ材料で作られた2枚の圧電素子409c及び409c'で構成されている。すなわち、圧電素子409cと409c'が強誘電性結晶で作られ、結晶軸の向きが互いに逆になるように配置される。この場合、圧電素子409cと409c'は電圧が印加されると逆方向に伸縮するので、薄膜409aを変形させる力が、図22に示した1層構造の場合よりも強くなり、結果的にミラー表面の形を大きく変えることができるという利点がある。

圧電素子409c、409c'に用いる材料としては、例えばチタン酸バリウム、ロッシエル塩、水晶、電気石、リン酸二水素カリウム（KDP）、リン酸二水素アンモニウム（ADP）、ニオブ酸リチウム等の圧電物質、同物質の多結晶

体、同物質の結晶、 $\text{PbZrO}_3$ と $\text{PbTiO}_3$ の固溶体の圧電セラミックス、ニフッ化ポリビニール（PVDF）等の有機圧電物質、上記以外の強誘電体等があり、特に有機圧電物質はヤング率が小さく、低電圧でも大きな変形が可能であるので、好ましい。なお、これらの圧電素子を利用する場合、厚さを不均一にすれば、上記構成例において薄膜409aの形状を適切に変形させることも可能である。

また、圧電素子409c、409c'の材料としては、ポリウレタン、シリコンゴム、アクリルエラストマー、PZT、PLZT、ポリフッ化ビニリデン（PVDF）等の高分子圧電体、シアン化ビニリデン共重合体、ビニリデンフルオリドとトリフルオロエチレンの共重合体等が用いられる。

圧電性を有する有機材料や、圧電性を有する合成樹脂、圧電性を有するエラストマー等を用いると可変ミラー面の大きな変形が実現できてよい。

なお、図22及び図26に示す圧電素子409cに、例えば、アクリルエラストマー、シリコンゴム等の電歪材料を用いる場合には、1層構造の圧電素子409cを別の基板409c-1と電歪材料409c-2とを貼り合わせた2層構造にしてもよい。

図26は可変ミラー409のさらに他の構成例を示す概略図である。本構成例の可変ミラーは、圧電素子409cが薄膜409aと電極409dとにより挟持され、薄膜409aと電極409dとの間に演算装置414により制御される駆動回路425aを介して電圧が印加されるようになっており、さらにこれとは別に、支持台423上に設けられた電極409bにも演算装置414により制御される駆動回路425bを介して電圧が印加されるように構成されている。したがって、本構成例では、薄膜409aは電極409dとの間に印加される電圧と電極409bに印加される電圧による静電気力とにより二重に変形され得、上記実施例に示した何れのものよりもより多くの変形パターンが可能であり、かつ、応答性も速いという利点がある。

薄膜409a、電極409d間の電圧の符号を変えれば、可変ミラーを凸面にも凹面にも変形させることができる。その場合、大きな変形を圧電効果で行ない、微細な形状変化を静電気力で行なってもよい。また、凸面の変形には圧電効果を

主に用い、凹面の変形には静電気力を主に用いてもよい。なお、電極 4 0 9 d は電極 4 0 9 b のように複数の電極から構成されてもよい。この様子を図 2 6 に示した。なお、本願では、圧電効果と電歪効果、電歪をすべてまとめて圧電効果と述べている。従って、電歪材料も圧電材料に含むものとする。

図 2 7 は可変ミラー 4 0 9 のさらに他の構成例を示す概略図である。本構成例の可変ミラーは、電磁気力を利用して反射面の形状を変化させ得るようにしたもので、支持台 4 2 3 の内部底面上には永久磁石 4 2 6 が、頂面上には窒化シリコン又はポリイミド等からなる基板 4 0 9 e の周縁部が載置固定されており、基板 4 0 9 e の表面にはアルミニウム等の金属コートで作られた薄膜 4 0 9 a が付設されていて、可変ミラー 4 0 9 を構成している。基板 4 0 9 e の下面には複数のコイル 4 2 7 が配設されており、これらのコイル 4 2 7 はそれぞれ駆動回路 4 2 8 を介して演算装置 4 1 4 に接続されている。したがって、各センサー 4 1 5, 4 1 6, 4 1 7, 4 2 4 および電子ズームのための画像処理装置 3 0 3 からの信号によって演算装置 4 1 4 において求められる光学系の変化に対応した演算装置 4 1 4 からの出力信号により、各駆動回路 4 2 8 から各コイル 4 2 7 にそれぞれ適当な電流が供給されると、永久磁石 4 2 6 との間に働く電磁気力で各コイル 4 2 7 は反発又は吸着され、基板 4 0 9 e 及び反射面として機能する薄膜 4 0 9 a を変形させる。

この場合、各コイル 4 2 7 はそれぞれ異なる量の電流を流すようにすることもできる。また、コイル 4 2 7 は 1 個でもよいし、永久磁石 4 2 6 を基板 4 0 9 e に付設しコイル 4 2 7 を支持台 4 2 3 の内部底面側に設けるようにしてもよい。また、コイル 4 2 7 はリソグラフィー等の手法で作るとよく、さらに、コイル 4 2 7 には強磁性体よりなる鉄心を入れるようにしてもよい。

この場合、薄膜コイル 4 2 7 の巻密度を、図 2 8 に示すように、場所によって変化させたコイル 4 2 8' とすることにより、基板 4 0 9 e 及び薄膜 4 0 9 a に所望の変形を与えるようにすることもできる。また、コイル 4 2 7 は 1 個でもよいし、また、これらのコイル 4 2 7 には強磁性体よりなる鉄心を挿入してもよい。

図 2 9 は可変ミラー 4 0 9 のさらに他の構成例を示す概略図である。本構成例の可変ミラーでは、基板 4 0 9 e は鉄等の強磁性体で作られており、反射膜とし

ての薄膜 409a はアルミニウム等からなっている。この場合、薄膜 409a 側にコイルを設けなくても、磁力によって薄膜 409a を変形させることができるから、構造が簡単で、製造コストを低減することができる。また、電源スイッチ 413 を、電流の流れる方向を切換え可能にする切換え兼用の電源開閉用スイッチに置換すれば、コイル 427 に流れる電流の方向を変えることができ、基板 409e 及び薄膜 409a の形状を自由に変えることができる。図 30 は本構成例におけるコイル 427 の一配置例を示し、図 31 はコイル 427 の他の配置例を示しているが、これらの配置は、図 27 に示した構成例にも適用することができる。なお、図 32 はコイル 427 の配置を図 31 に示したように放射状とした場合に適する永久磁石 426 の一配置例を示している。図 32 に示すように、棒状の永久磁石 426 を放射状に配置すれば、図 27 に示した構成例に比べて、微妙な変形を基板 409e 及び薄膜 409a に与えることができる。また、このように電磁気力を用いて基板 409e 及び薄膜 409a を変形させる場合（図 27 及び図 29 の構成例）は、静電気力を用いた場合よりも低電圧で駆動できるという利点がある。

以上いくつかの可変ミラーの構成例を述べたが、薄膜 409a で変形されるミラーの形を変形させるのに、図 26 の構成例に示すように、2 種類以上の力を用いてもよい。つまり静電気力、電磁力、圧電効果、磁歪、流体の圧力、電場、磁場、温度変化、電磁波等のうちから 2 つ以上を同時に用いて反射面を形成する薄膜を変形させてもよい。つまり 2 つ以上の異なる駆動方法を用いて光学特性可変光学素子を作れば、大きな変形と微細な変形とを同時に実現でき、精度の良い鏡面が実現できる。

図 33 は本発明のさらに他の実施例に係る、光学装置に適用可能な可変ミラー 409 を用いた撮像系、例えば携帯電話のデジタルカメラ、カプセル内視鏡、電子内視鏡、パソコン用デジタルカメラ、PDA 用デジタルカメラ等に用いられる撮像系の概略構成図である。本実施例の撮像系は、可変ミラー 409 と、レンズ 902 と、固体撮像素子 408 と、制御系 103 とで一つの撮像ユニット 104 を構成している。本実施例の撮像ユニット 104 では、レンズ 902 を通った物体からの光は可変ミラー 409 で集光され、固体撮像素子 408 の上に結像する。

可変ミラー 409 は、光学特性可変光学素子の一種であり、可変焦点ミラーとも呼ばれている。

本実施例によれば、物体距離が変わっても可変ミラー 409 を変形させることでピント合わせをすることができ、レンズをモータ等で駆動する必要がなく、小型化、軽量化、低消費電力化の点で優れている。また、撮像ユニット 104 は本発明の撮像系としてすべての実施例で用いることができる。また、可変ミラー 409 を複数用いることでズーム、変倍の撮像系、光学系を作ることができる。

なお、図 33 では、制御系 103 にコイルを用いたトランスの昇圧回路を含む制御系の構成例を示している。特に積層型圧電トランスを用いると、小型化できてよい。昇圧回路は電気を用いる可変ミラー、可変焦点レンズに用いることができるが、特に静電気力、圧電効果を用いる場合の可変ミラー、可変焦点レンズに有用である。なお可変ミラー 409 でピント合わせを行うためには、たとえば固体撮像素子 408 に物体像を結像させ可変ミラー 409 の焦点距離を変化させつつ物体像の高周波成分が最大になる状態を見つければよい。高周波成分を検出するには、たとえば固体撮像素子 408 にマイクロコンピュータ等を含む処理装置を接続し、その中で高周波成分を検出すればよい。

図 34 は可変ミラーのさらに他の構成例を示し、マイクロポンプ 180 で流体 161 を出し入れし、支持台 189a の上部に張った膜で形成されるミラー面を変形させる可変ミラー 188 の概略図である。本実施例によれば、ミラー面を大きく変形させることが可能になるというメリットがある。図中、168 は支持台 189a 内の流体 161 の量を、マイクロポンプ 180 とともに制御する制御装置であり、この制御装置 168 とマイクロポンプ 180 は、膜 189 の変形を制御するので、実施の形態の駆動回路 304 に相当する構成となる。マイクロポンプ 180 は、例えば、マイクロマシンの技術で作られた小型のポンプで、電力で動くように構成されている。マイクロマシンの技術で作られたポンプの例としては、熱変形を利用したもの、圧電材料を用いたもの、静電気力を用いたものなどがある。

図 35 は図 34 に示したマイクロポンプ 180 の構成例を示す概略図である。本構成例のマイクロポンプ 180 では、振動板 181 は静電気力、圧電効果等の

電気力により振動する。図 3 5 では静電気力により振動する例を示しており、図 3 5 中、1 8 2, 1 8 3 は電極である。また、点線は変形した時の振動板 1 8 1 を示している。振動板 1 8 1 の振動に伴い、2 つの弁 1 8 4, 1 8 5 が開閉し、流体 1 6 1 を右から左へ送るようになっている。

図 3 4 で示した可変ミラー 1 8 8 では、反射面を構成する膜 1 8 9 が流体 1 6 1 の量に応じて凹凸に変形することで、可変ミラーとして機能する。流体としては、シリコンオイル、空気、水、ゼリー、等の有機物、無機物を用いることができる。

なお、静電気力、圧電効果を用いた可変ミラー、可変焦点レンズなどにおいては、駆動用に高電圧が必要になる場合がある。その場合には、例えば図 3 3 に示すように、昇圧用のトランス、あるいは圧電トランス等を用いて制御系を構成するとよい。

また、反射面を形成する薄膜 4 0 9 a 又は膜 1 8 9 は、支持台 4 2 3 あるいは支持台 1 8 9 a などの輪帯状部分の上部などの変形しない部分に設けておくと、可変ミラーの反射面の形状を干渉計等で測定する場合に、基準面として使うことができ便利である。

図 3 6 は各実施の形態で述べた本発明の光学装置に適用可能な光学系を構成するレンズ、あるいはレンズ群の一部を、可変焦点レンズに置き換えて構成することにより、前記レンズあるいはレンズ群を光軸方向にズーミングしなくて済む構成とする可変焦点レンズの原理的構成を示す図である。この可変焦点レンズ 5 1 1 は、第 1, 第 2 の面としてのレンズ面 5 0 8 a, 5 0 8 b を有する第 1 のレンズ 5 1 2 a と、第 3, 第 4 の面としてのレンズ面 5 0 9 a, 5 0 9 b を有する第 2 のレンズ 5 1 2 b と、これらレンズ間に透明電極 5 1 3 a, 5 1 3 b を介して設けた高分子分散液晶層 5 1 4 とで構成される第 3 のレンズ 5 1 2 c とを有し、入射光を第 1, 第 3, 第 2 のレンズ 5 1 2 a, 5 1 2 c, 5 1 2 b を経て収束させるものである。透明電極 5 1 3 a, 5 1 3 b は、スイッチ 5 1 5 を介して交流電源 5 1 6 に接続して、高分子分散液晶層 5 1 4 に交流電圧を選択的に印加するようにする。なお、高分子分散液晶層 5 1 4 は、それぞれ液晶分子 5 1 7 を含む球状、多面体等の任意の形状の多数の微小な高分

子セル 5 1 8 を有して構成し、その体積は、高分子セル 5 1 8 を構成する高分子および液晶分子 5 1 7 がそれぞれ占める体積の和に一致させる。

ここで、高分子セル 5 1 8 の大きさは、例えば球状とする場合、その平均の直径  $D$  を、使用する光の波長を  $\lambda$  とするとき、例えば、

$$2 \text{ nm} \leq D \leq \lambda / 5 \quad \dots (21)$$

とする。すなわち、液晶分子 5 1 7 の大きさは、2 nm 程度以上であるので、平均の直径  $D$  の下限値は、2 nm 以上とする。また、 $D$  の上限値は、可変焦点レンズ 5 1 1 の光軸方向における高分子分散液晶層 5 1 4 の厚さ  $t$  にも依存するが、 $\lambda$  に比べて大きいと、高分子の屈折率と液晶分子 5 1 7 の屈折率との差により、高分子セル 5 1 8 の境界面で光が散乱して高分子分散液晶層 5 1 4 が不透明になってしまうため、後述するように、好ましくは  $\lambda / 5$  以下とする。可変焦点レンズが用いられる光学製品によっては高精度を要求しない場合もあり、そのとき  $D$  は  $\lambda$  以下でよい。なお、高分子分散液晶層 5 1 4 の透明度は、厚さ  $t$  が厚いほど悪くなる。

また、液晶分子 5 1 7 は、例えば、一軸性のネマティック液晶分子を用いる。この液晶分子 5 1 7 の屈折率楕円体は、図 3 7 に示すような形状となり、

$$n_{ox} = n_{oy} = n_o \quad \dots (22)$$

である。ただし、 $n_o$  は常光線の屈折率を示し、 $n_{ox}$  および  $n_{oy}$  は、常光線を含む面内での互いに直交する方向の屈折率を示す。

ここで、図 3 6 に示すように、スイッチ 5 1 5 をオフ、すなわち高分子分散液晶層 5 1 4 に電界を印加しない状態では、液晶分子 5 1 7 が様々な方向を向いているので、入射光に対する高分子分散液晶層 5 1 4 の屈折率は高く、屈折力の強いレンズとなる。これに対し、図 3 8 に示すように、スイッチ 5 1 5 をオンとして高分子分散液晶層 5 1 4 に交流電圧を印加すると、液晶分子 5 1 7 は、屈折率楕円体の長軸方向が可変焦点レンズ 5 1 1 の光軸と平行となるように配向するので、屈折率が低くなり、屈折力の弱いレンズとなる。

なお、高分子分散液晶層 5 1 4 に印加する電圧は、例えば、図 3 9 に示すように、可変抵抗器 5 1 9 を用いることにより段階的あるいは連続的に変化させることもできる。このようにすれば、印加電圧が高くなるにつれて、液晶分子



5 1 7 は、その楕円長軸が徐々に可変焦点レンズ 5 1 1 の光軸と平行となるように配向するので、屈折力を段階的あるいは連続的に変えることができる。

ここで、図 3 6 に示す状態、すなわち高分子分散液晶層 5 1 4 に電圧を印加しない状態での、液晶分子 5 1 7 の平均屈折率  $n_{LC}'$  は、図 3 7 に示すように、屈折率楕円体の長軸方向の屈折率を  $n_z$  とすると、およそ

$$(n_{ox} + n_{oy} + n_z) / 3 \equiv n_{LC}' \quad \dots (23)$$

となる。また、上記 (22) 式が成り立つときの平均屈折率  $n_{LC}$  は、 $n_z$  を異常光線の屈折率  $n_c$  と表して、

$$(2n_o + n_e) / 3 \equiv n_{LC} \quad \dots (24)$$

で与えられる。このとき、高分子分散液晶層 5 1 4 の屈折率  $n_A$  は、高分子セル 5 1 8 を構成する高分子の屈折率を  $n_p$  とし、高分子分散液晶層 5 1 4 の体積に占める液晶分子 5 1 7 の体積の割合を  $f_f$  とすると、マックスウェル・ガーネットの法則により、

$$n_A = f_f \cdot n_{LC}' + (1 - f_f) n_p \quad \dots (25)$$

で与えられる。

したがって、図 3 9 に示すように、レンズ 5 1 2 a および 5 1 2 b の内側の面、すなわち高分子分散液晶層 5 1 4 側の面の曲率半径を、それぞれ  $R_1$  および  $R_2$  とすると、高分子分散液晶層で構成される第 3 のレンズ 5 1 2 c の焦点距離  $f_1$  は、

$$1 / f_1 = (n_A - 1) (1 / R_1 - 1 / R_2) \quad \dots (26)$$

で与えられる。なお、 $R_1$  および  $R_2$  は、曲率中心が像点側にあるとき、正とする。また、レンズ 5 1 2 a および 5 1 2 b の外側の面による屈折は除いている。つまり、高分子分散液晶層 5 1 4 のみによるレンズ 5 1 2 c の焦点距離が、(26) 式で与えられる。

また、常光線の平均屈折率を、

$$(n_{ox} + n_{oy}) / 2 = n_o' \quad \dots (27)$$

とすれば、図 3 8 に示す状態、すなわち高分子分散液晶層 5 1 4 に電圧を印加した状態での、高分子分散液晶層 5 1 4 の屈折率  $n_B$  は、

$$n_B = f_f \cdot n_o' + (1 - f_f) n_p \quad \dots (28)$$

で与えられるので、この場合の高分子分散液晶層 5 1 4 のみによるレンズ 5 1 2 c の焦点距離  $f_2$  は、

$$1/f_2 = (n_B - 1)(1/R_1 - 1/R_2) \quad \dots (29)$$

で与えられる。なお、高分子分散液晶層 5 1 4 に、図 3 8 に示す状態における電圧よりも低い電圧を印加する場合の焦点距離は、(26) 式で与えられる焦点距離  $f_1$  と、(29) 式で与えられる焦点距離  $f_2$  との間の値となる。

上記 (26) および (29) 式から、高分子分散液晶層 5 1 4 による焦点距離の変化率は、

$$|(f_2 - f_1)/f_2| = |(n_B - n_A)/(n_A - 1)| \quad \dots (30)$$

で与えられる。したがって、この変化率を大きくするには、 $|n_B - n_A|$  を大きくすればよい。ここで、

$$n_B - n_A = f f (n_o' - n_{LC}') \quad \dots (31)$$

であるから、 $|n_o' - n_{LC}'|$  を大きくすれば、変化率を大きくすることができる。実用的には、 $n_B$  が、1.3 ~ 2 程度であるから、

$$0.01 \leq |n_o' - n_{LC}'| \leq 1.0 \quad \dots (32)$$

とすれば、 $f f = 0.5$  のとき、高分子分散液晶層 5 1 4 による焦点距離を、0.5 % 以上変えることができるので、効果的な可変焦点レンズを得ることができる。なお、 $|n_o' - n_{LC}'|$  は、液晶物質の制限から、1.0 を越えることはできない。

次に、上記 (21) 式の上限値の根拠について説明する。「Solar Energy Materials and Solar Cells」31 巻, Wilson and Eck, 1993, Elsevier Science Publishers B. v. 発行の第 197 ~ 214 頁、「Transmission variation using scattering/transparent switching films」には、高分子分散液晶の大きさを変化させたときの透過率  $\tau$  の変化が示されている。そして、かかる文献の第 206 頁、図 6 には、高分子分散液晶の半径を  $r$  とし、 $t = 300 \mu\text{m}$ 、 $f f = 0.5$ 、 $n_p = 1.45$ 、 $n_{LC} = 1.585$ 、 $\lambda = 500 \text{ nm}$  とするとき、透過率  $\tau$  は、理論値で、 $r = 5 \text{ nm}$  ( $D = \lambda / 50$ 、 $D \cdot t = \lambda \cdot 6 \mu\text{m}$  (ただし、 $D$  および  $\lambda$  の単位は  $\text{nm}$ 、以下も同じ)) のとき  $\tau \approx 90\%$  となり、 $r = 25 \text{ nm}$  ( $D = \lambda / 10$ ) のとき  $\tau \approx 50\%$  になることが示されている。

ここで、例えば、 $t = 150 \mu m$ の場合を推定してみると、透過率 $\tau$ が $t$ の指数関数で変化すると仮定して、 $t = 150 \mu m$ の場合の透過率 $\tau$ を推定してみると、 $r = 25 nm$  ( $D = \lambda / 10$ 、 $D \cdot t = \lambda \cdot 15 \mu m$ ) のとき $\tau \approx 71\%$ となる。また、 $t = 75 \mu m$ の場合は、同様に、 $r = 25 nm$  ( $D = \lambda / 10$ 、 $D \cdot t = \lambda \cdot 7.5 \mu m$ ) のとき $\tau \approx 80\%$ となる。

これらの結果から、

$$D \cdot t \leq \lambda \cdot 15 \mu m \quad \dots (33)$$

であれば、 $\tau$ は $70\% \sim 80\%$ 以上となり、レンズとして十分実用になる。したがって、例えば、 $t = 75 \mu m$ の場合は、 $D \leq \lambda / 5$ で、十分な透過率が得られることになる。

また、高分子分散液晶層 5 1 4 の透過率は、 $n_p$ の値が $n_{LC}'$ の値に近いほど良くなる。一方、 $n_o'$ と $n_p$ とが異なる値になると、高分子分散液晶層 5 1 4 の透過率は悪くなる。図 3 6 に示した状態と図 3 8 に示した状態とで、平均して高分子分散液晶層 5 1 4 の透過率が良くなるのは、

$$n_p = (n_o' + n_{LC}') / 2 \quad \dots (34)$$

を満足するときである。

ここで、可変焦点レンズ 5 1 1 は、レンズとして使用するものであるから、図 3 6 の状態でも、図 3 8 の状態でも、透過率はほぼ同じで、かつ高い方がよい。そのためには、高分子セル 5 1 8 を構成する高分子の材料および液晶分子 5 1 7 の材料に制限があるが、実用的には、

$$n_o' \leq n_p \leq n_{LC}' \quad \dots (35)$$

とすればよい。

上記 (34) 式を満足すれば、上記 (33) 式は、さらに緩和され、

$$D \cdot t \leq \lambda \cdot 60 \mu m \quad \dots (36)$$

であれば良いことになる。なぜなら、フレネルの反射則によれば、反射率は屈折率差の 2 乗に比例するので、高分子セル 5 1 8 を構成する高分子と液晶分子 5 1 7 との境界での光の反射、すなわち高分子分散液晶層 5 1 4 の透過率の減少は、およそ上記の高分子と液晶分子 5 1 7 との屈折率の差の 2 乗に比例するからである。

以上は、 $n_o' \cong 1.45$ 、 $n_{LC}' \cong 1.585$ の場合であったが、より一般的に定式化すると、

$$D \cdot t \leq \lambda \cdot 15 \mu m \cdot (1.585 - 1.45)^2 / (n_u - n_p)^2 \quad \dots (37)$$

であればよい。ただし、 $(n_u - n_p)^2$ は、 $(n_{LC}' - n_p)^2$ と $(n_o' - n_p)^2$ とのうち、大きい方である。

また、可変焦点レンズ511の焦点距離変化を大きくするには、 $f_f$ の値が大きい方がよいが、 $f_f = 1$ では、高分子の体積がゼロとなり、高分子セル518を形成できなくなるので、

$$0.1 \leq f_f \leq 0.999 \quad \dots (38)$$

とする。一方、 $f_f$ は、小さいほど $\tau$ は向上するので、上記(37)式は、好ましくは、

$$4 \times 10^{-6} [\mu m]^2 \leq D \cdot t \leq \lambda \cdot 45 \mu m \cdot (1.585 - 1.45)^2 / (n_u - n_p)^2 \quad \dots (39)$$

とする。なお、 $t$ の下限値は、図36から明らかのように、 $t = D$ で、 $D$ は、上述したように2nm以上であるので、 $D \cdot t$ の下限値は、 $(2 \times 10^{-3} \mu m)^2$ 、すなわち $4 \times 10^{-6} [\mu m]^2$ となる。

なお、物質の光学特性を屈折率で表す近似が成り立つのは、「岩波科学ライブラリー8 小惑星がやってくる」向井正著、1994、岩波書店発行の第58頁に記載されているように、 $D$ が10nm～5nmより大きい場合である。また、 $D$ が500 $\lambda$ を越えると、光の散乱は幾何学的となり、高分子セル518を構成する高分子と液晶分子517との界面での光の散乱がフレネルの反射式に従って増大するので、 $D$ は、実用的には、

$$7 \text{ nm} \leq D \leq 500 \lambda \quad \dots (40)$$

とする。

図40は、図39に示す可変焦点レンズ511を、本発明の実施の形態にかかる光学装置の中で、明るさ絞り521と撮像素子との間に用いた撮像光学系、例えば一例として、デジタルカメラ用の撮像光学系に用いた例を示す図である。この撮像光学系においては、物体（図示せず）の像を、絞り521、可変焦点レンズ511およびレンズ522を介して、例えばCCDよりなる固体撮像素子523上に結像させる。なお、図40では、液晶分子の図示を省略してある。

このように構成された撮像光学系によれば、可変抵抗器 5 1 9 により可変焦点レンズ 5 1 1 の高分子分散液晶層 5 1 4 に印加する交流電圧を調整して、可変焦点レンズ 5 1 1 の焦点距離を変えることより、可変焦点レンズ 5 1 1 およびレンズ 5 2 2 を光軸方向に移動させることなく、例えば、無限遠から 6 0 0 mm までの物体距離に対して、連続的に合焦させることが可能となる。

図 4 1 は図 3 9 に示した可変焦点レンズと同様に、本発明の実施の形態にかかる光学装置の中で、撮像光学系の焦点距離を可変にするように用いられる可変焦点回折光学素子の一構成例を示す図である。

本構成例の可変焦点回折光学素子 5 3 1 は、平行な第 1, 第 2 の面 5 3 2 a, 5 3 2 b を有する第 1 の透明基板 5 3 2 と、光の波長オーダーの溝深さを有する断面鋸歯波状のリング状回折格子を形成した第 3 の面 5 3 3 a および平坦な第 4 の面 5 3 3 b を有する第 2 の透明基板 5 3 3 とを有し、入射光を第 1, 第 2 の透明基板 5 3 2, 5 3 3 を経て出射させるものである。第 1, 第 2 の透明基板 5 3 2, 5 3 3 間には、図 3 6 に示した構成例において説明したのと同様に、透明電極 5 1 3 a, 5 1 3 b を介して高分子分散液晶層 5 1 4 を設け、透明電極 5 1 3 a, 5 1 3 b をスイッチ 5 1 5 を経て交流電源 5 1 6 に接続して、高分子分散液晶層 5 1 4 に交流電圧を印加するようにする。

このような構成において、可変焦点回折光学素子 5 3 1 に入射する光線は、第 3 の面 5 3 3 a の格子ピッチを  $p$  とし、 $m$  を整数とすると、

$$p \sin \theta = m \lambda \quad \cdots (41)$$

を満たす角度  $\theta$  だけ偏向されて出射される。また、溝深さを  $h$ 、透明基板 3 3 の屈折率を  $n_{33}$  とし、 $k$  を整数とすると、

$$h (n_A - n_{33}) = m \lambda \quad \cdots (42)$$

$$h (n_B - n_{33}) = k \lambda \quad \cdots (43)$$

を満たせば、波長  $\lambda$  で回折効率が 1 0 0 % となり、フレアの発生を防止することができる。

ここで、上記 (42) 式および (43) 式の両辺の差を求めると、

$$h (n_A - n_B) = (m - k) \lambda \quad \cdots (44)$$

が得られる。したがって、例えば、 $\lambda = 500 \text{ nm}$ 、 $n_A = 1.55$ 、 $n_B =$

1. 5 とすると、

$$0.05h = (m - k) \cdot 500 \text{ nm}$$

となり、 $m = 1$ 、 $k = 0$  とすると、

$$h = 10000 \text{ nm} = 10 \mu\text{m}$$

となる。この場合、透明基板 533 の屈折率  $n_{33}$  は、上記 (42) 式から、 $n_{33} = 1.5$  であればよい。また、可変焦点回折光学素子 531 の周辺部における格子ピッチ  $p$  を  $10 \mu\text{m}$  とすると、 $\theta \simeq 2.87^\circ$  となり、F ナンバーが 10 のレンズを得ることができる。

このように構成された可変焦点回折光学素子 531 は、高分子分散液晶層 514 への印加電圧のオン・オフで光路長が変わるので、例えば、レンズ系の光束が平行でない部分に配置して、ピント調整を行うのに用いたり、レンズ系全体の焦点距離等を変えるのに用いることができる。

なお、この実施形態において、上記 (42) ~ (44) 式は、実用上、

$$0.7m\lambda \leq h(n_A - n_{33}) \leq 1.4m\lambda \quad \cdots (45)$$

$$0.7k\lambda \leq h(n_B - n_{33}) \leq 1.4k\lambda \quad \cdots (46)$$

$$0.7(m - k)\lambda \leq h(n_A - n_B) \leq 1.4(m - k)\lambda \quad \cdots (47)$$

を満たせば良い。

また、ツイストネマティック液晶を用いる可変焦点レンズもある。図 42 および図 43 はこの場合の可変焦点眼鏡 550 の構成を示す図である。可変焦点レンズ 551 は、レンズ 552 および 553 と、これらレンズの内面上にそれぞれ透明電極 513a、513b を介して設けた配向膜 539a、539b と、これら配向膜間に設けたツイストネマティック液晶層 554 とを有して構成されており、その透明電極 513a、513b を可変抵抗器 519 を経て交流電源 516 に接続して、ツイストネマティック液晶層 554 に交流電圧を印加するようにして構成されている。

このような構成において、ツイストネマティック液晶層 554 に印加する電圧を高くすると、液晶分子 555 は、図 43 に示すように、ホメオトロピック配向となり、図 42 に示す印加電圧が低いツイストネマティック状態の場合に比べて、ツイストネマティック液晶層 554 の屈折率は小さくなり、焦点距離

が長くなる。

ここで、図 4 2 に示すツイストネマティック状態における液晶分子 5 5 5 の螺旋ピッチ  $P$  は、光の波長  $\lambda$  に比べて同じ程度か十分小さくする必要があるので、例えば、

$$2nm \leq P \leq 2\lambda / 3 \quad \dots (48)$$

とする。なお、この条件式の下限値は、液晶分子の大きさで決まり、上限値は、入射光が自然光の場合に、図 4 2 の状態でツイストネマティック液晶層 5 5 4 が等方媒質として振る舞うために必要な値である。また、この条件式の上限値を満たさないと、可変焦点レンズ 5 5 1 は偏光方向によって焦点距離の異なるレンズとなり、そのために二重像が形成されてぼけた像しか得られなくなる。

図 4 4 (a) は本発明の実施の形態にかかる光学装置に用いる光学系に配置可能な可変偏角プリズムの一構成例を示す図である。この可変偏角プリズム 5 6 1 は、第 1, 第 2 の面 5 6 2 a, 5 6 2 b を有する入射側の第 1 の透明基板 5 6 2 と、第 3, 第 4 の面 5 6 3 a, 5 6 3 b を有する出射側の平行平板状の第 2 の透明基板 5 6 3 とを有する。入射側の透明基板 5 6 2 の内面 (第 2 の面) 5 6 2 b は、フレネル状に形成し、この透明基板 5 6 2 と出射側の透明基板 5 6 3 との間に、図 3 6 に示した構成例において説明したのと同様に、透明電極 5 1 3 a, 5 1 3 b を介して高分子分散液晶層 5 1 4 を設ける。透明電極 5 1 3 a, 5 1 3 b は、可変抵抗器 5 1 9 を経て交流電源 5 1 6 に接続し、これにより高分子分散液晶層 5 1 4 に交流電圧を印加して、可変偏角プリズム 5 6 1 を透過する光の偏角を制御するようにする。なお、図 4 4 (a) に示す構成例では、透明基板 5 6 2 の内面 5 6 2 b をフレネル状に形成したが、例えば、図 4 4 (b) に示すように、透明基板 5 6 2 および 5 6 3 の内面を相対的に傾斜させた傾斜面を有する通常のプリズム状に形成することもでき、あるいは図 4 1 に示した構成例のような回折格子状に形成することもできる。回折格子状に形成する場合には、上記の (41) 式 ~ (47) 式が同様にあてはまる。

このように構成された可変偏角プリズム 5 6 1 は、例えば、TV カメラ、デジタルカメラ、フィルムカメラ、双眼鏡等の光学系の中に用いることによりブレ防止用として有効に用いることができる。この場合、可変偏角プリズム 5 6

1の屈折方向（偏向方向）は、上下方向とするのが望ましいが、さらに性能を向上させるためには、2個の可変偏角プリズム561を偏向方向を異ならせて、例えば図45に示すように、上下および左右の直交する方向で屈折角を変えるように配置するのが望ましい。なお、図44および図45に示す構成例では、液晶分子の図示を省略してある。

図46は本発明の実施の形態にかかる光学装置の光学系の中で、可変ミラー409の替わりに用いる可変焦点ミラー、すなわち、可変焦点レンズの一方のレンズ面に反射膜を設けて形成した可変焦点ミラーの構成例を示す図である。

本構成例の可変焦点ミラー565は、第1、第2の面566a、566bを有する第1の透明基板566と、第3、第4の面567a、567bを有する第2の透明基板567とを有する。第1の透明基板566は、平板状またはレンズ状に形成して、内面（第2の面）566bに透明電極513aを設け、第2の透明基板567は、内面（第3の面）567aを凹面状に形成して、該凹面上に反射膜568を施し、さらにこの反射膜568上に透明電極513bを設ける。透明電極513a、513b間には、図36に示した構成例において説明したのと同様に、高分子分散液晶層514を設け、これら透明電極513a、513bをスイッチ515および可変抵抗器519を経て交流電源516に接続して、高分子分散液晶層514に交流電圧を印加するようにする。なお、図46では、液晶分子の図示を省略してある。

このような構成によれば、透明基板566側から入射する光線は、反射膜568により高分子分散液晶層514を折り返す光路となるので、高分子分散液晶層514の作用を2回もたせることができると共に、高分子分散液晶層514への印加電圧を変えることにより、反射光の焦点位置を変えることができる。この場合、可変焦点ミラー565に入射した光線は、高分子分散液晶層514を2回透過するので、高分子分散液晶層514の厚さの2倍を $t$ とすれば、上記の各式を同様に用いることができる。なお、透明基板566または567の内面を、図41に示した構成例のような回折格子状にして、高分子分散液晶層514の厚さを薄くすることもできる。このようにすれば、散乱光をより少なくできる利点がある。



なお、以上の説明では、液晶の劣化を防止するため、電源として交流電源 5 1 6 を用いて、液晶に交流電圧を印加するようにしたが、直流電源を用いて液晶に直流電圧を印加するようにすることもできる。また、液晶分子の方向を変える方法としては、電圧を変化させること以外に、液晶にかける電場の周波数、液晶にかける磁場の強さ・周波数、あるいは液晶の温度等を変化させることによってよい。以上に説明した高分子分散液晶は液状ではなく固体に近いものもあるので、その場合はレンズ 5 1 2 a, 5 1 2 b の一方、透明基板 5 3 2、レンズ 5 3 8、レンズ 5 5 2, 5 5 3 の一方、図 4 4 (a) の構成例における透明基板 5 6 3、図 4 4 (b) の構成例における透明基板 5 6 2, 5 6 3 の一方、透明基板 5 6 6, 5 6 7 の一方はなくてもよい。

以上、図 3 6 から図 4 6 の構成例で述べたような、媒質の屈折率が変わることによって光学素子の焦点距離等が変化するタイプの光学素子は、形状が変化しないため機械設計が容易である、機械的構造が簡単になる等のメリットがある。

図 4 7 は可変焦点レンズ 1 4 0 を、本発明の実施の形態にかかる光学装置の中で、撮像素子 4 0 8 の前方に用いた撮像光学系の一構成例を示す図である。撮像光学系は撮像ユニット 1 4 1 として用いることができる。本構成例では、レンズ 1 0 2 と可変焦点レンズ 1 4 0 とで、撮像レンズを構成している。そして、この撮像レンズと撮像素子 4 0 8 とで撮像ユニット 1 4 1 を構成している。可変焦点レンズ 1 4 0 は、透明部材 1 4 2 と一对の電極 1 4 5 との間に密閉された圧電性のある合成樹脂等の柔らかい透明物質 1 4 3 とで、光を透過する流体あるいはゼリー状物質 1 4 4 を挟んで構成されている。流体あるいはゼリー状物質 1 4 4 としては、シリコンオイル、弾性ゴム、ゼリー、水等を用いることができる。透明物質 1 4 3 の両面には透明電極 1 4 5 が設けられており、回路 1 0 3' を介して電圧を加えることで、透明物質 1 4 3 の圧電効果により透明物質 1 4 3 が変形し、可変焦点レンズ 1 4 0 の焦点距離が変わるようになっている。従って、本構成例によれば、物体距離が変わった場合でも光学系をモーター等で動かすことなくフォーカスができ、小型、軽量、消費電力が少ない点で優れている。

なお、図 4 7 中、1 4 5 は透明電極、1 4 6 は流体をためるシリンダーである。また、透明物質 1 4 3 の材質としては、ポリウレタン、シリコンゴム、アクリル

エラストマー、PZT、PLZT、ポリフッ化ビニリデン（PVDF）等の高分子圧電体、シアン化ビニリデン共重合体、ビニリデンフルオライドとトリフルオロエチレンの共重合体等が用いられる。

圧電性を有する有機材料や、圧電性を有する合成樹脂、圧電性を有するエラストマー等を用いると可変焦点レンズ面の大きな変形が実現できてよい。可変焦点レンズには透明な圧電材料を用いるとよい。

なお、図47の構成例において、可変焦点レンズ140は、シリンダー146を設けるかわりに、図48に示すように、透明部材142に対して平行な位置にリング状の支援部材147を設け、透明部材142と支援部材147との距離を維持した状態としてシリンダー146を省略した構造にしてもよい。

図48の構成例では、支援部材147と透明部材142との間には、一対の電極145間に密閉された透明物質143と、外周側が変形可能な部材148で覆われた流体あるいはゼリー状物質44とが介挿されており、透明物質143に電圧をかけることによって、透明物質143が変形しても、図49に示すように、可変焦点レンズ140全体の体積が変わらないように変形するため、シリンダー146が不要になる。なお、図48、図49中、148は変形可能な部材で、弾性体、アコーディオン状の合成樹脂または金属等でできている。

図47及び図48に示す構成例では、電圧を逆に印加すると透明物質143は逆向きに変形するので凹レンズにすることも可能である。

なお、透明物質143に電歪材料、例えば、アクリルエラストマー、シリコンゴム等を用いる場合は、透明物質143を透明基板と電歪材料を貼り合わせた構造にするとよい。

図50は本発明の実施の形態にかかる光学装置の撮像光学系の中に挿入可能な可変焦点レンズのさらに他の構成例に係る、マイクロポンプ160で流体161を出し入れし、レンズ面を変形させる可変焦点レンズ162の概略図である。

マイクロポンプ160は、例えば、マイクロマシンの技術で作られた小型のポンプで、電力で動くように構成されている。流体161は、透明基板163と、弾性体164との間に挟まれている。図50中、165は弾性体164を保護するための透明基板で、設けなくてもよい。マイクロマシンの技術で作られたポン

プの例としては、熱変形を利用したもの、圧電材料を用いたもの、静電気力を用いたものなどがある。そして、図 3 5 で示したようなマイクロポンプ 1 8 0 を、例えば、図 5 0 に示す可変焦点レンズに用いるマイクロポンプ 1 6 0 のように、2 つ用いればよい。

なお、静電気力、圧電効果を用いた可変焦点レンズなどにおいては、駆動用に高電圧が必要になる場合がある。その場合には、昇圧用のトランス、あるいは圧電トランス等を用いて制御系を構成するとよい。この場合、積層型圧電トランスを用いると小型化できてよい。

図 5 1 は本発明の実施の形態にかかる光学装置の光学系に適用可能な光学特性可変光学素子の他の構成例であって、圧電材料 2 0 0 を用いた可変焦点レンズ 2 0 1 の概略構成図である。圧電材料 2 0 0 には、透明物質 1 4 3 と同様の材料が用いられており、圧電材料 2 0 0 は、透明で柔らかい基板 2 0 2 の上に設けられている。なお、基板 2 0 2 には、合成樹脂、有機材料を用いるのが望ましい。

本構成例においては、2 つの透明電極 5 9 を介して電圧を圧電材料 2 0 0 に加えることで圧電材料 2 0 0 は変形し、図 5 1 に示す状態においては凸レンズとしての作用を持っている。

なお、基板 2 0 2 の形をあらかじめ凸状に形成しておき、かつ、2 つの透明電極 5 9 のうち、少なくとも一方の電極の大きさを基板 2 0 2 と異ならせておく、例えば、一方の透明電極 5 9 を基板 2 0 2 よりも小さくしておくと、電圧を切ったときに、図 5 2 に示すように、2 つの透明電極 5 9 が対向する所定部分だけが凹状に変形して凹レンズの作用を持つようになり、可変焦点レンズとして動作する。このとき基板 2 0 2 は、流体 1 6 1 の体積が変化しないように変形するので、液溜 1 6 8 が不要になるというメリットがある。本構成例では、流体 1 6 1 を保持する基板の一部分を圧電材料で変形させて、液溜 1 6 8 を不要としたところに大きなメリットがある。

なお、図 5 0 に示した構成例にも言えることであるが、透明基板 1 6 3, 1 6 5 はレンズとして構成しても、或いは平面で構成してもよい。

図 5 3 は本発明の実施の形態にかかる光学装置の光学系に適用可能な光学特性可変光学素子のさらに他の構成例であって圧電材料からなる 2 枚の薄板 2 0 0 A,

200Bを用いた可変焦点レンズの概略構成図である。本構成例の可変焦点レンズによれば、薄板200Aと200Bの材料の方向性を反転させることで、変形量を大きくし、大きな可変焦点範囲が得られるというメリットがある。図53中、204はレンズ形状の透明基板である。本構成例においても、紙面の右側の透明電極59は基板202よりも小さく形成されている。

なお、図51～図53の構成例において、基板202、薄板200、200A、200Bの厚さを不均一にして、電圧を掛けたときの変形のさせかたをコントロールしてもよい。そのようにすれば、レンズの収差補正等もすることができ、便利である。

図54は本発明の実施の形態にかかる光学装置の光学系に適用可能な可変焦点レンズのさらに他の構成例を示す概略構成図である。本構成例の可変焦点レンズ207は、例えばシリコンゴムやアクリルエラストマー等の電歪材料206を用いて構成されている。

このように構成された可変焦点レンズ207は、電圧が低いときには、図54に示すように、凸レンズとして作用し、電圧を上げると、図55に示すように、電歪材料206が上下方向に伸びて左右方向に縮むので、焦点距離が伸びる。従って、可変焦点レンズとして動作する。従って、本構成例の可変焦点レンズによれば、大電源を必要としないので消費電力が小さくて済むというメリットがある。

以上述べた図47～図55に示した可変焦点レンズに共通して言えるのは、レンズとして作用する媒質の形状が変化することで、可変焦点を実現していることである。屈折率が変化する可変焦点レンズに比べて、焦点距離変化の範囲が自由に選べる、大きさが自由に選べる、等のメリットがある。

図56は本発明の実施の形態にかかる光学装置の光学系に適用可能な光学特性可変光学素子のさらに他の構成例であって、フォトメカニカル効果を用いた可変焦点レンズの概略構成図である。本構成例の可変焦点レンズ214は、透明弾性体208、209でアゾベンゼン210が挟まれており、アゾベンゼン210には、透明なスペーサー211を經由して紫外光が照射されるようになっている。図56中、212、213はそれぞれ中心波長が $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ の例えば紫外LED、紫外半導体レーザー等の紫外光源である。

本構成例において、中心波長が $\lambda_1$ の紫外光が図57(a)に示すトランス型のアゾベンゼンに照射されると、アゾベンゼン210は、図57(b)に示すシス型に変化して体積が減少する。このため、可変焦点レンズ214の形状は薄くなり、凸レンズ作用が減少する。一方、中心波長が $\lambda_2$ の紫外光がシス型のアゾベンゼン210に照射されると、アゾベンゼン210はシス型からトランス型に変化して、体積が増加する。このため、可変焦点レンズ214の形状は厚くなり、凸レンズ作用が増加する。このようにして、本構成例の光学素子214は可変焦点レンズとして作用する。また、可変焦点レンズ214では、透明弾性体208、209の空気との境界面で紫外光が全反射するので外部に光がもれず、効率がよい。

図58は本発明の実施の形態にかかる光学装置の光学系に適用可能な可変ミラーのさらに他の構成例を示す概略構成図である。本構成例では、デジタルカメラの撮像光学系に用いられるものとして説明する。なお、図58中、411は可変抵抗器を内蔵した駆動回路、414は演算装置、415は温度センサー、416は湿度センサー、417は距離センサー、424は振れセンサーである。

本構成例の可変ミラー45は、支持台423で外周側が支持されたアクリルエラストマー等の有機材料からなる電歪材料453と間を隔てて分割電極409bを設け、電歪材料453の上に順に電極452、変形可能な基板451を設け、さらにその上に入射光を反射するアルミニウム等の金属の薄膜からなる反射膜450を設けた4層構造として構成されている。

このように構成すると、分割電極409bを電歪材料453と一体化した場合に比べて、反射膜450の面形状が滑らかになり、光学的に収差を発生させるにくくなるというメリットがある。

なお、変形可能な基板451と電極452の配置は逆でも良い。また、図58中、449は光学系の変倍、あるいはズームを行なう釦であり、可変ミラー45は、釦449を使用者が押すことで反射膜450の形を変形させて、変倍あるいは、ズームをすることができるよう演算装置414を介して制御されている。

なお、アクリルエラストマー等の有機材料からなる電歪材料のかわりに既に述べたチタン酸バリウム等の圧電材料を用いてもよい。

なお、本発明の光学装置に適用可能な可変ミラーに共通して言えることである

が、反射面の変形する部分を反射面に垂直な方向から見た時の形は、軸上光線の入射面の方向に長い形状、たとえば、楕円、卵形または多角形等にするのが良い。なぜなら、図 3 3 に示した構成例のように、可変ミラーは斜入射で用いる場合が多いが、このとき発生する収差を抑えるためには、反射面の形状は回転楕円面、回転放物面、回転双曲面に近い形が良く、そのように可変ミラーを変形させる為には、反射面の変形する部分を反射面に垂直な方向から見た時の形を、軸上光線の入射面の方向に長い形状にしておくのが良いからである。

図 5 9 A 及び図 5 9 B は、本発明の実施の形態にかかる光学装置の光学系に適用可能な電磁駆動型の可変ミラーの構造を示した図である。図 5 9 B は反射膜の反対側から見た図であり、変形部材にコイル（電極）が設けられて駆動回路から電流を流すことで永久磁石の磁場とで電磁力を生じ、ミラー形状が変化するようにになっている。コイルは薄膜コイル等を用いると製作が容易で、かつ、剛性を下げられるのでミラーが変形し易くて良い。

図 6 0 はニュートン式反射望遠鏡の従来例を示す概略構成図である。本従来例の望遠鏡 3 4 5 では、対物面鏡 3 4 4 で反射された光は、斜鏡 3 1 7 で折り曲げられ、低倍接眼レンズ 3 1 8 の視野絞り 3 1 9 の位置に実像が結像し、利用者の眼 3 2 0 で観察することができるようになっている。低倍接眼レンズ 3 1 8 のかわりに高倍接眼レンズ 3 2 1 を用いれば、視野中央付近の高倍観察ができる。図中、3 2 2 は高倍接眼レンズ 3 2 1 の視野絞りで、その大きさは、低倍接眼レンズ 3 1 8 の視野絞り 3 1 9 よりも小さい。低倍接眼レンズ 3 1 8 は光軸上では高倍観察に適している。しかしながら、低倍接眼レンズ 3 1 8 を用いた場合には、視野周辺部で強いコマ収差が発生し、観察画像の鮮鋭度が低下する欠点がある。

そこで、図 6 1 に示すように、本発明の一実施形態にかかる光学装置として形状可変ミラー 4 0 9 を用いた反射望遠鏡 3 2 8 では、斜鏡 3 1 7 のかわりに形状可変ミラー 4 0 9 を用いることで上記欠点を解決している。なお、形状可変ミラー 4 0 9 としては、電磁駆動型あるいは圧電駆動型の可変ミラーが凹凸両方に変形できるので適しているが、他の駆動方式のものでもよい。

本実施形態の反射望遠鏡 3 2 8 によれば、低倍接眼レンズ 3 1 8 を用いた場合、薄膜 4 0 9 a の形は画像周辺部のコマ収差が減るように変形する。視野中心部の

画像の鮮鋭度は低下するが、低倍のため目立たず、視野全面にわたり良好な画像が得られる。一方、高倍率望遠鏡 3 2 1 を用いた場合には、薄膜 4 0 9 a は平面になり、視野中心では収差のない鮮鋭度の高い画像が図 6 0 に示した従来例の望遠鏡 3 4 5 の場合と同様に観察できる。形状可変ミラー 4 0 9 は、接眼レンズの交換に伴って収差を変化させることができるように、駆動回路 3 0 4 によって駆動される。

本実施形態の反射望遠鏡 3 2 8 のように、形状可変ミラー 4 0 9 を用いると、変倍機能のある観察装置でも利用者の使用する画像範囲について像の鮮鋭度を向上させることができる。なお、形状可変ミラー 4 0 9 のかわりに可変焦点レンズ等を用いても良い。

図 6 2 は本発明のさらに他の実施形態にかかる光学装置として可変焦点レンズ 2 0 1 を用いた顕微鏡 3 2 9 の概略構成図である。本実施形態の顕微鏡 3 2 9 では、物体 3 1 4 の像は高倍対物レンズ 3 3 2 によって拡大されて鏡筒レンズ 3 3 4 で結像され視野絞り 3 3 5 上に実像を作る。その実像を、観察者が接眼レンズ 3 3 6 で拡大して観察するようになっている。高倍対物レンズ 3 3 2 は、レボルバー 3 3 7 により切り換えられて低倍対物レンズ 3 3 8 にすることもできる。

従来の顕微鏡では、鏡筒レンズ 3 3 4 が通常のレンズで構成されているため、レンズの交換に伴って生ずる対物レンズと鏡筒レンズとの組合せによる収差が、対物レンズ変更時に変動し、必ずしも最良の結像状態とはならない。

これに対して、本実施例の顕微鏡は、対物レンズの変更に連携して、可変焦点レンズ 2 0 1 の光線の屈折作用を変え、対物レンズと鏡筒レンズとを組合せた収差が最良になるように構成されている。つまり、本実施例の顕微鏡 3 2 9 では、観察される物体の範囲が変化したとき、その範囲の像の鮮鋭度が最良になるように、可変焦点レンズ 2 0 1 の収差を変えるべく、可変焦点レンズ 2 0 1 が演算装置 4 1 4 を介して駆動回路 3 4 1 により駆動されるようになっている。

上記説明では、対物レンズと鏡筒レンズとを組合せて生じる収差を最適化するようにしたが、対物レンズと、鏡筒レンズ 3 3 4 と、接眼レンズ 3 3 6 とを組合せて生じる収差を、各組合せに対して可変焦点レンズ 2 0 1 を変化させて最適化するように制御されてももちろん良い。

また、以上においては、肉眼観察の場合について説明したが、フィルムカメラ、あるいは電子カメラ、TVカメラ等を顕微鏡に組合せる場合においても同様に収差を最適化できる。

図62に示した顕微鏡329では、光路切換ミラー339を図において左側に退避させることで、TVカメラ342で撮影することができるようになっている。このとき、TVカメラのレンズ343と、鏡筒レンズ334と、対物レンズとの組合せで生ずる収差を可変焦点レンズ201によって最適化することで、より良い撮影ができる。

このように、複数の対物レンズ、接眼レンズ、鏡筒レンズ等の光学ユニットを組合せて使用する光学装置の場合、各種組合せで変動する収差を可変焦点レンズ201のような光学特性可変光学素子を変化させて最適化することで、像の鮮鋭度を上げることができる。本実施例においても、可変焦点レンズ201のかわりに形状可変ミラー409を用いてももちろん良い。

最後に、本発明で用いる用語の定義を述べておく。

光学装置とは、光学系あるいは光学素子を含む装置のことである。光学装置単体で機能しなくてもよい。つまり、装置の一部でもよい。

光学装置には、撮像装置、観察装置、表示装置、照明装置、信号処理装置、光情報処理装置等が含まれる。

撮像装置の例としては、フィルムカメラ、デジタルカメラ、PDA用デジタルカメラ、ロボットの眼、レンズ交換式デジタル一眼レフカメラ、テレビカメラ、動画記録装置、電子動画記録装置、カムコーダ、VTRカメラ、携帯電話のデジタルカメラ、携帯電話のテレビカメラ、電子内視鏡等がある。デジカメ、カード型デジカメ、テレビカメラ、VTRカメラ、動画記録カメラ、携帯電話のデジタルカメラ、携帯電話のテレビカメラ、などはいずれも電子撮像装置の一例である。

観察装置の例としては、顕微鏡、望遠鏡、眼鏡、双眼鏡、ルーペ、ファイバースコープ、ファインダー、ビューファインダー等がある。

表示装置の例としては、液晶ディスプレイ、ビューファインダー、ゲームマシン（ソニー社製プレイステーション）、ビデオプロジェクター、液晶プロジェクター、頭部装着型画像表示装置（head mounted display）



HMD)、PDA(携帯情報端末)、携帯電話等がある。

照明装置の例としては、カメラのストロボ、自動車のヘッドライト、内視鏡光源、顕微鏡光源等がある。

信号処理装置の例としては、携帯電話、パソコン、ゲームマシン、光ディスクの読取・書込装置、光計算機の演算装置、光インターコネクション装置、光情報処理装置等がある。

撮像素子は、例えばCCD、撮像管、固体撮像素子、写真フィルム等を指す。また、平行平板はプリズムの1つに含まれるものとする。観察者の変化には、視度の変化を含むものとする。被写体の変化には、被写体となる物体距離の変化、物体の移動、物体の動き、振動、物体のぶれ等を含むものとする。

拡張曲面の定義は以下の通りである。

球面、平面、回転対称非球面のほか、光軸に対して偏心した球面、平面、回転対称非球面、あるいは対称面を有する非球面、対称面を1つだけ有する非球面、対称面のない非球面、自由曲面、微分不可能な点、線を有する面等、いかなる形をしていても良い。反射面でも、屈折面でも、光になんらかの影響を与えうる面ならば良い。本発明では、これらを総称して拡張曲面と呼ぶことにする。

光学特性可変光学素子とは、可変焦点レンズ、可変ミラー、面形状が変わる偏光プリズム、頂角可変プリズム、光偏向作用が変わる可変回折光学素子、つまり可変HOE、可変DOE等を含む。可変焦点レンズには、焦点距離が変化せず、収差量が変わるような可変レンズも含むものとする。可変ミラーには、焦点距離が変化せず、収差量が変わるようなミラー、可変焦点レンズに反射面を設けたミラー、形状が変わらない可変焦点ミラー、形状が変わる形状可変ミラー等を含むものとする。要するに、光学素子で、光の反射、屈折、回折等の光偏向作用が変化するものを光学特性可変光学素子と呼ぶ。

本発明では、光学特性可変光学素子の拡張曲面となる光学面、すなわち、光偏光作用を有する光学面は、物体の光束に対し、光線通過位置の違いによる光束の分割を行わない大きさ(寸法)で形成されている。

情報発信装置とは、携帯電話、固定式の電話、ゲームマシン、テレビ、ラジカセ、ステレオ等のリモコンや、パソコン、パソコンのキーボード、マウス、タッ

チパネル等の何らかの情報を入力し、送信することができる装置を指す。撮像装置のついたテレビモニター、パソコンのモニター、ディスプレイも含むものとする。情報発信装置は、信号処理装置の中に含まれる。